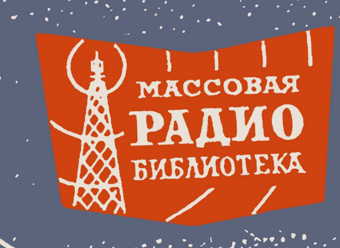




Распространение УКВ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

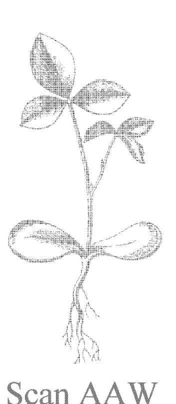
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 382

Г. П. ГРУДИНСКАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

Издание второе, переработанное





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

В книге приводятся сведения о радиоволнах, антеннах, электрических свойствах поверхности земли и атмосферы и рассматриваются особенности распространения радиоволн различных диапазонов, в основном ультракоротковолнового.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Грудинская Галина Петровна

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

Редактор *А. Х. Якобсон* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 12/VII 1960 г. Подписано к печати 28/IX 1960 г.
Т-12822 Бумага 84×108$^{1}/_{32}$ 5,33 печ. л. Уч.-изд. л. 5,8
Тираж 50 000 экз. 1-й завод 15 000 экз. Зак. 2359
Цена 2 р. 30 к. (с. 1. I. 1961 г. цена 23 коп.).

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

За 3 года, истекшие со времени первого издания книги, вопросы распространения ультракоротких волн (УКВ) получили дальнейшее развитие. Появился ряд работ в области дальнего тропосферного распространения УКВ, были созданы новые системы связи, использующие отражение радиоволн от следов метеоров, Луны и искусственных спутников Земли. Продолжались успешные исследования и в области распространения радиоволн других диапазонов.

Эти и другие достижения в области распространения радиоволн представляют большой интерес для широкого круга радиолюбителей. Поэтому во втором, переработанном и дополненном издании книги значительное место отведено новым данным о распространении радиоволн, более подробно описаны методы экспериментального исследования ионосферы, включен материал по распространению волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов, введена глава о распространении радиоволн всех диапазонов.

Изучению распространения УКВ было посвящено много теоретических и экспериментальных исследований. Большой вклад в это дело внесли советские ученые Б. А. Введенский и В. А. Фок. В настоящее время в этой области проводится большая работа. Непрерывно изыскиваются новые виды связи на УКВ. Недавно освоена дальняя связь на УКВ с использованием рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы и ионосферы. Испытываются линии УКВ связи с использованием отражения радиоволн от следов метеоров. Делаются попытки создания «искусственной ионосферы» и осуществления радиосвязи путем отражения радиоволн от Луны. С помощью радиоволн советские ученые впервые в истории человечества сумели передать на Землю изображение невидимой стороны Луны. Все это сви-

детельствует о важности вопросов распространения радиоволн и, в частности, УКВ.

Массовый опыт радиолюбителей много помог в решении ряда проблем распространения радиоволн. Радиолюбители были пионерами коротковолновой связи. Своими работами они способствовали расширению сведений о распространении УКВ, их опыты по дальнему приему телевидения дают ценные материалы для новых научных обобщений.

Мы полагаем, что данная книга, расширяя кругозор радиолюбителей в области распространения радиоволн, будет способствовать их дальнейшей активной работе по освоению новых диапазонов и опытам по дальнему и сверхдальнему приему телевидения.

Редакция МРБ

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОВОЛНАХ И АНТЕННАХ

РАДИОВОЛНЫ

Радиоволны представляют собой электромагнитные колебания, частота которых может иметь величину от 30 *кгц* до 300 000 *Мгц*. Длина волны λ равна расстоянию между двумя максимумами или минимумами напряженности поля

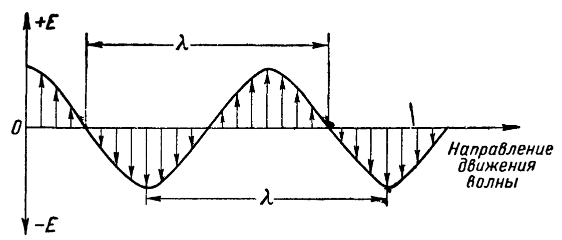


Рис. 1. К определению понятия длины волны.

(рис. 1). Частота электромагнитных колебаний связана с длиной волны соотношением

$$\lambda = \frac{v}{f}, \qquad (1)$$

где λ — длина волны;

f — частота колебаний;

v — скорость распространения волны.

Скорость распространения радиоволн в пустоте равна скорости света $c = 300\,000$ *км/сек*. При распространении в какой-либо другой среде скорость движения волны изменяется:

$$v = \frac{c}{n}, \qquad (2)$$

где n — коэффициент преломления среды.

В однородной среде, т. е. в среде, свойства которой не меняются по всему объему, волна движется прямолинейно с постоянной скоростью. При переходе волны из одной среды в другую на границе раздела двух сред происходит преломление и отражение волны. Волна частично проходит во вторую среду, причем направление ее движения меняется, а сама она частично отражается от границы раздела (рис. 2). В этом случае угол падения волны равен углу ее

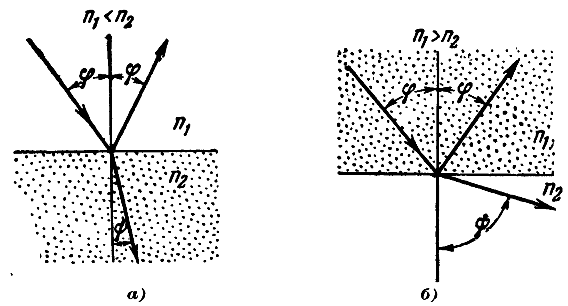


Рис. 2. Преломление радиоволн.

а — при переходе из менее плотной среды в более плотную; *б* — при переходе из более плотной среды в менее плотную.

отражения, а угол падения φ и угол преломления ψ связаны соотношением

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\psi}=\frac{n_2}{n_1}, \tag{3}$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты преломления первой и второй сред соответственно.

Если поверхность, на которую падает волна, представляет собой идеальный проводник, то волна полностью отражается от границы раздела и не проходит во вторую среду. Такое отражение называется зеркальным.

В случае, когда свойства среды (коэффициент ее преломления) неодинаковы в различных местах, т. е. когда среда неоднородна, волна преломляется и движется по криволинейной траектории. Чем более неоднородна среда, чем резче меняется коэффициент преломления, тем больше кривизна траектории (рис. 3).

Явление искривления траектории волны в неоднородной среде называется рефракцией. В том случае, когда волна переходит из среды с меньшим коэффициентом преломле-

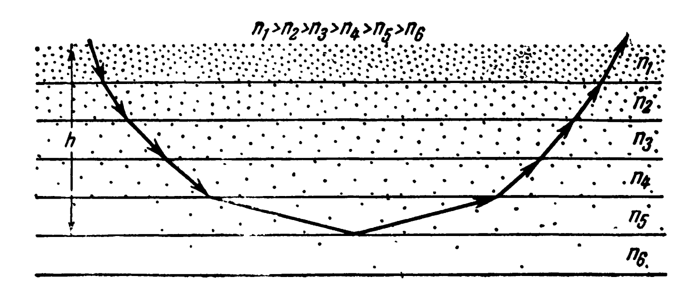
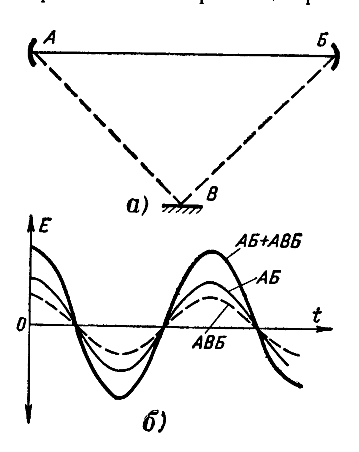


Рис. 3. Рефракция радиоволн в среде с меняющимся коэффициентом преломления.

ния в среду с бóльшим коэффициентом преломления (например, из воды в воздух) при достаточно большом угле падения может наступить явление полного внутреннего отражения, т. е. вся энергия волны отразится от границы раздела и не проникнет во вторую среду.

Явление полного внутреннего отражения может иметь место и в неоднородной среде, когда коэффициент преломления среды уменьшается в направлении движения волны. При этом волна не проникает дальше некоторого определенного расстояния (расстояние *h* на рис. 3).

Нередко в место приема приходит не одна, а две или несколько волн одной и той же частоты. Например, если передающая антенна расположена в точке *А* (рис. 4,*а*), а на некотором расстоянии от нее имеется отражающая поверхность *В*, то в точку *Б* волны могут прийти двумя путями: прямым путем по линии *АБ* и по пути *АВБ*. В точке *Б* происходит сложение полей этих двух волн — интер-



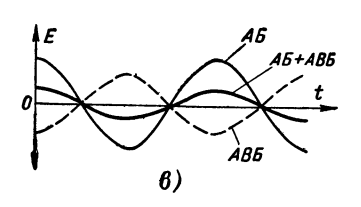


Рис. 4. Интерференция двух волн, пришедших различными путями.

ференция, причем результирующее поле может оказаться либо больше, либо меньше полей отдельных волн. Если разность длин путей *АВБ* и *АБ* составляет целое число длин волн, то поля складываются в фазе и результирующее поле оказывается больше полей отдельных волн (рис. 4,*б*). Если же разность длин волн составляет целое число полуволн, то поля вычитаются (складываются в противофазе) и результирующая напряженность поля оказывается меньше складывающихся полей (рис. 4,*в*).

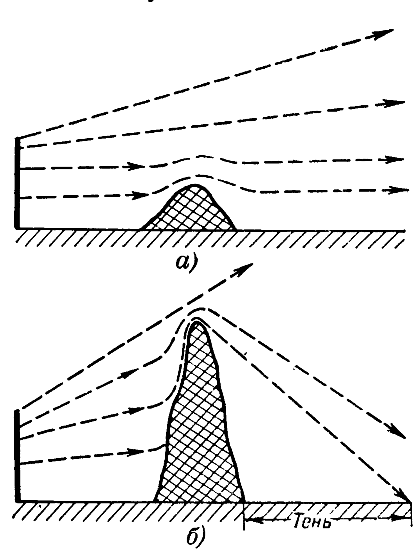


Рис. 5. Дифракция радиоволн.
а — препятствие мало по сравнению с длиной волны; *б* — препятствие велико по сравнению с длиной волны.

Представим себе, что положение отражающей поверхности меняется таким образом, что разность длин путей *АВБ* и *АБ* составляет то целое число длин волн, то целое число полуволн. Тогда амплитуда результирующего поля будет меняться от максимальной величины до минимальной, т. е. напряженность поля будет то увеличиваться, то уменьшаться. Такие колебания напряженности поля называются замираниями.

Если на пути распространения волны встречается непрозрачное препятствие, то волна стремится его обогнуть (рис. 5). Явление огибания волной встречающихся на ее пути препятствий называется дифракцией. Дифракция наиболее сильно проявляется в том случае, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны. Если препятствие очень мало по сравнению с длиной волны, то дифракция сказывается слабо и на интенсивность поля за препятствием не влияет (рис. 5,*а*). При относительно больших размерах препятствия волна практически его не огибает и за препятствием образуется область тени (рис. 5,*б*).

Интенсивность радиоволны можно характеризовать напряженностью электрического или магнитного поля, которые связаны определенным соотношением. Обычно изме-

ряют напряженность электрического поля, так как это практически удобнее. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (*в/м*), милливольтах на метр (*мв/м*) или микровольтах на метр (*мкв/м*): 1 *мкв/м* $= 10^{-3}$ *мв/м* $= 10^{-6}$ *в/м*.

Часто напряженность поля измеряют в относительных логарифмических единицах — децибеллах (*дб*): 1 *дб* $= 20 \lg E/E_0$.

Обычно принимают $E_0 = 1$ *мкв/м* или 1 *мв/м*. Поэтому напряженность поля, например, 1 000 *мкв/м* будет равна 60 *дб* (т. е. на 60 *дб* выше 1 *мкв/м*).

АНТЕННЫ

Антенна, одинаково излучающая во все стороны, называется ненаправленной. На рис. 6,*а* показано распределение излученной мощности в пространстве вокруг ненаправленной антенны, т. е. изображена диаграмма ее направленности. У такой антенны эта диаграмма представляет собой окружность. В большинстве случаев желательно сосредоточить излучаемую антенной мощность в определенном направлении, т. е. сузить диаграмму направленности, придав ей вид, изображенный на рис. 6,*б*. Угол θ, в пределах которого заключена основная часть излучаемой мощности, характеризует ширину диаграммы направленности. Степень концентрации излучения антенны в желаемом направлении определяется коэффициентом направленного действия антенны. Он обозначается буквой *D*. Направленная антенна, излучающая мощность *P*, создает такую же напряженность поля в месте приема, как ненаправленная антенна, излучающая мощность *PD*.

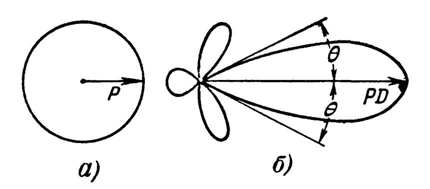


Рис. 6. Диаграммы направленности антенн.

а — ненаправленная антенна; *б* — направленная антенна.

Если размеры антенны больше или немного меньше длины волны, то такая антенна может обладать направленностью. Выполнить направленные антенны для волн длиной в тысячи метров почти невозможно. В диапазоне сантиметровых волн удается сконцентрировать излученную энергию в угле менее 1°. Линейные размеры такой антенны достигают нескольких метров.

Не вся мощность, подводимая от передатчика к антенне, излучается. Отношение мощности, излученной антенной, к мощности, подведенной к ней, называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) антенны. Произведение к. п. д. антенны на ее коэффициент направленного действия называется коэффициентом усиления антенны. Коэффициент усиления антенны УКВ может достигать больших значений. Для антенн типа «волновой канал» в диапазоне метровых волн коэффициент усиления лежит в пределах 5—20, а для параболической антенны в диапазоне сантиметровых волн он достигает 10^4—10^5.

При распространении радиоволн в свободном пространстве без учета влияния поверхности и атмосферы Земли эффективное значение напряженности поля, создаваемого антенной, можно подсчитать по формуле

$$E\ \text{мв/м} = 173 \frac{\sqrt{P\ \text{квт}\ D}}{r\ \text{км}}, \qquad (4)$$

где P — излучаемая мощность;
D — коэффициент направленного действия антенны;
r — расстояние от передающей антенны до точки приема.

Из этой формулы следует, что напряженность поля обратно пропорциональна расстоянию от передающей антенны до точки приема и пропорциональна квадратному корню из величины излучаемой мощности.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

Радиоволны, распространяющиеся в атмосфере непосредственно вблизи земной поверхности, называют поверхностными (рис. 7). На их распространение оказывают большое влияние свойства поверхности земли и нижних слоев атмосферы. Радиоволны, распространяющиеся путем отражения от верхних ионизированных слоев атмосферы, называют пространственными. Условия их распространения зависят главным образом от состояния ионизированных слоев атмосферы.

Нижний слой атмосферы, непосредственно прилегающий к поверхности Земли и простирающийся до 10—14 *км*,

называют тропосферой, а верхние ионизированные слои, расположенные на высоте от 60 до 400—600 *км*, — ионосферой.

Так как радиоволны являются электромагнитными колебаниями, то на условия их распространения оказывают влияние электрические свойства среды, определяемые ее проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Проводимость веществ определяется наличием свободных электронов в веществе. Чем больше свободных (способных перемещаться) электронов в кубическом сантиметре вещества, тем ближе его электрические свойства к свойству проводника. Диэлектрические свойства вещества определяются способностью молекул вещества поворачиваться под действием электрического поля. Чем больше проводимость вещества, тем больше энергии теряет электромагнитная волна при распространении в этом веществе. Не следует смешивать это обстоятельство с явлением уменьшения потерь в проводе при увеличении его проводимости.

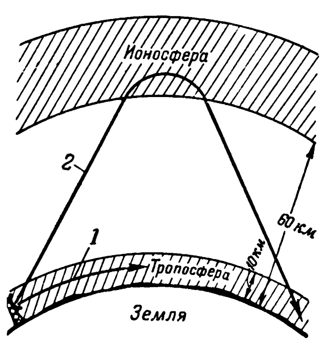


Рис. 7. Расположение тропосферы и ионосферы и пути распространения поверхностной (*1*) и пространственной (*2*) радиоволн.

Наличие у веществ свойств проводника и диэлектрика приводит к тому, что в веществах одновременно существуют токи проводимости, совпадающие по фазе с напряжением, и токи смещения, отличающиеся по фазе от напряжения на 90°. Если токи проводимости значительно больше токов смещения, то вещество можно считать проводником, при обратном соотношении — диэлектриком. Величина тока смещения зависит от частоты колебаний, поэтому и соотношение между величинами токов проводимости и смещения меняется в зависимости от частоты колебаний. Таким образом, одно и то же вещество может проявлять на разных частотах то свойства проводника, то свойства диэлектрика. Это относится, конечно, и к электрическим свойствам поверхности Земли (суши и моря) и атмосфере.

Определить электрические свойства поверхности Земли довольно сложно из-за неоднородности ее состава. Электрические свойства сухой и влажной почвы различны. Свой-

ства пресной и морской воды различны. Для длинных волн морская вода и влажная почва обладают свойствами проводника, а для ультракоротких волн любой вид поверхности Земли, кроме поверхности моря, можно считать почти идеальным диэлектриком. Это упрощает рассмотрение многих вопросов распространения УКВ. Но возникает другая сложность: даже небольшие неровности поверхности оказывают существенное влияние на распространение УКВ.

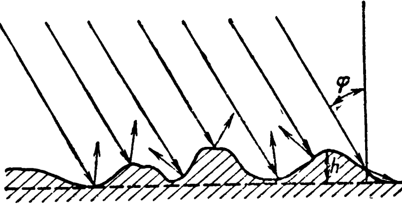


Рис. 8. Рассеяние радиоволн на неровной поверхности Земли.

При падении радиоволн на неровную земную поверхность имеет место рассеянное отражение, причем напряженность поля отраженной волны получается меньше, чем в случае отражения от гладкой поверхности. При отражении от Земли радиоволны рассеиваются в тех случаях, когда высота неровности h больше некоторой величины, зависящей от длины волны λ и угла падения волны на поверхность φ (рис. 8), т. е. когда

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \varphi}. \qquad (5)$$

Полого падающие волны рассеиваются высокими неровностями, а отвесно падающие — невысокими. Понятие «неровность поверхности» различно для различных длин волн: для коротких волн неровностями являются холмы, здания, деревья; для волн длиной 3—10 *см* даже травяной покров и небольшие бугры являются неровностями.

ТРОПОСФЕРА

В пределах тропосферы воздух имеет такой же состав, как и у поверхности Земли, т. е. состоит главным образом из азота и кислорода (78 и 21% по объему соответственно). Состояние воздуха в тропосфере характеризуется давлением воздуха, температурой и влажностью. С увеличением высоты над поверхностью Земли плотность воздуха уменьшается. Обычно уменьшаются и влажность и температура воздуха. Это объясняется тем, что в пределах тропосферы воздух нагревается за счет излучения тепла поверхностью Земли. Поэтому параметры тропосферы меняются в зависимости от времени года, суток и метеорологических условий.

Коэффициент преломления воздуха принято считать равным 1. Но это справедливо только в первом приближении. В действительности коэффициент преломления тропосферы зависит от давления, температуры и влажности воздуха и незначительно отличается от 1. При нормальных давлении, влажности и температуре коэффициент преломления составляет примерно 1,00034. Зависимость коэффициента преломления от давления p, температуры T и давления водяных паров $p_п$ определяется следующей формулой, коэффициенты в которой были подобраны опытным путем:

$$(n-1)\cdot 10^6=\frac{78,5}{T}\left(p+\frac{4\,800p_п}{T}\right), \qquad (6)$$

где n — коэффициент преломления воздуха (величина безразмерная);

T — абсолютная температура, °К ($T=273+t$° С);

p и $p_п$ — давления, *мбар*.

Коэффициент преломления с увеличением высоты над поверхностью Земли уменьшается, стремясь к 1. Поэтому нижние слои атмосферы являются неоднородной средой, причем параметры ее меняются в зависимости от времени суток, года и погоды. Неоднородности изменения коэффициента преломления атмосферы существенны до высоты примерно 10 *км*. Уже на этой высоте значение $(n—1)=$ $=109\cdot 10^{-6}$ и постоянно на всем земном шаре.

Как видно из приведенных цифр, абсолютная величина коэффициента преломления атмосферы изменяется мало. Но на распространение радиоволн оказывает влияние не абсолютная величина коэффициента преломления, а закон его изменения с высотой. Многочисленные наблюдения показали, что в средних широтах среднее состояние атмосферы характеризуется равномерным изменением ее коэффициента преломления с высотой. Атмосфера, в которой коэффициент преломления уменьшается на $4\cdot 10^{-8}$ на каждый метр изменения высоты, называется нормальной атмосферой.

Измерения показали, что закон изменения коэффициента преломления тропосферы в зависимости от высоты часто сильно отличается от линейного. Бывают случаи, когда коэффициент преломления сначала убывает при увеличении высоты, затем с некоторого уровня начинает возрастать и затем снова убывает. Иногда вблизи поверхности Земли коэффициент преломления возрастает при увеличе-

нии высоты, а затем начинает уменьшаться. На рис. 9 приведен график изменения коэффициента преломления воздуха в зависимости от высоты.

Как отмечалось выше, неоднородность атмосферы в вертикальном направлении приводит к искривлению траектории волны, т. е. к рефракции. С изменением коэффициента преломления меняется и траектория распространения волны. Следовательно, всякое изменение метеорологических условий влияет на распространение УКВ. Поэтому для изучения условий распространения УКВ весьма важно иметь достаточно полные метеорологические данные.

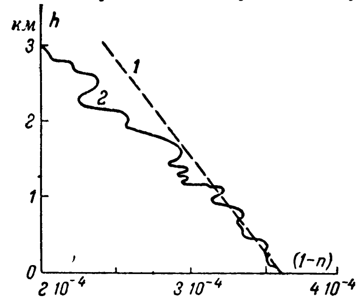


Рис. 9. Изменение коэффициента преломления воздуха в зависимости от высоты.

1 — идеальная кривая для нормальной атмосферы, *2* — кривая, полученная в результате измерений

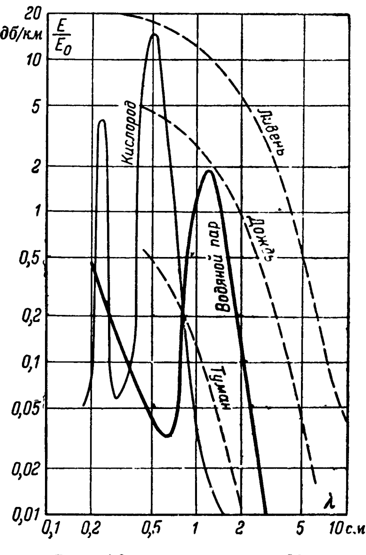


Рис. 10. Поглощение УКВ в тропосфере.

Тропосфера неоднородна и в горизонтальном направлении. В ней имеются местные неоднородности. Так, например, в некоторых местах воздух имеет сравнительно высокую температуру или влажность. Поэтому в отдельных точках тропосферы коэффициент преломления может заметно отличаться от среднего значения. Таким образом, в тропосфере имеются объемные неоднородности. Причиной их появления является турбулентное движение воздуха в атмосфере, т. е. движение с завихрениями. Отдельные участки поверхности земли нагреваются различно. От этого в тропосфере появляются восходящие и нисходящие воздушные потоки и в разных участках плотность воздуха оказывается различной. Объемные неоднородности тропосферы

также оказывают большое влияние на распространение УКВ, вызывая рассеяние радиоволн.

Проводимость воздуха очень мала, поэтому при распространении в тропосфере радиоволны длиннее 30 *см* практически не испытывают поглощения. Более короткие волны поглощаются в капельках воды. Поле радиоволн высокой частоты наводит в капельках воды токи смещения, а за счет проводимости воды возникают потери, т. е. поглощение энергии радиоволн. Кроме того, происходит рассеяние радиоволн капельками воды. Вследствие этих двух причин радиоволны сантиметрового диапазона претерпевают поглощение при прохождении через зону дождя и тумана. Поглощение тем сильнее, чем интенсивнее дождь. На рис. 10 пунктирными кривыми представлена зависимость поглощения радиоволн от длины волны в дождях различной интенсивности.

Сантиметровые и миллиметровые волны могут воздействовать на молекулы содержащихся в воздухе газов и претерпевают резонансное поглощение. Так, волна длиной 1,25 *см* интенсивно поглощается парами воды, волны длиной 0,5 *см* — кислородом воздуха (сплошные кривые, рис. 10).

ИОНОСФЕРА

Ионосфера стала доступной для непосредственного изучения только в последнее десятилетие, когда начали осуществляться запуски геофизических ракет. До этого исследования ионосферы проводились косвенными методами.

Само название ионосферы указывает на то, что некоторая часть атомов и молекул находящихся в ней газов ионизирована, т. е. имеется значительное количество заряженных частиц — ионов и электронов. Ионы и электроны образуются в результате ионизации, которая заключается в отрыве электрона от нейтральной молекулы. Для того чтобы оторвать электрон, необходимо затратить некоторую энергию. Основным источником энергии, идущей на ионизацию газа в атмосфере, является Солнце, излучающее ультрафиолетовые лучи и быстролетящие частицы — корпускулы. Пока атмосфера освещена Солнцем, в ней непрерывно образуются все новые и новые электроны, но одновременно часть старых электронов сталкивается с ионами и опять образует нейтральные частицы — атомы и молекулы. С заходом Солнца образование новых электронов почти прекращается и количество свободных электронов убывает. Количество электронов, находящихся в 1 $см^3$ газа, называется электронной плотностью.

Наличие свободных электронов в газе приводит к изменению электрических свойств газа. Представим себе конденсатор, площадь пластин которого равна 1 *см*^{2}, а расстояние между ними составляет 1 *см* (рис. 11). Если такой конденсатор поместить в вакуум, то емкость его будет равна электрической постоянной вакуума ε_0. Введем в объем, заключенный между пластинами конденсатора, некоторое количество электронов N. Каждый из них имеет массу m и заряд e. К пластинам конденсатора приложено переменное напряжение амплитуды V_m, изменяющееся с угловой частотой ω: $V = V_m \cos \omega t$. Под влиянием электрического поля электроны придут в колебательное движение с частотой поля. При этом амплитуда скорости электрона u будет тем больше, чем больше его заряд e и величина электрического поля V и чем меньше его масса m и частота поля ω:

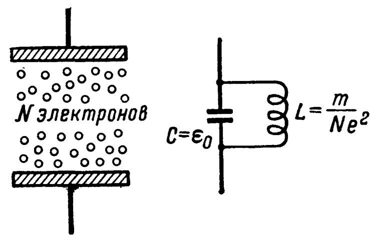


Рис. 11. К выводу выражения для диэлектрической проницаемости ионизированного газа.

$$u = \frac{e}{\omega m} V \sin \omega t. \qquad (7)$$

Наибольшего значения скорость достигает в тот момент, когда напряженность поля равна нулю, т. е. изменение скорости отстает от изменения напряженности поля на $^1/_4$ периода.

Движущиеся заряды есть не что иное, как ток, причем амплитуда тока I определяется величиной общего заряда Ne, умноженного на скорость u:

$$I = Neu = \frac{Ne^2}{\omega m} V = \frac{V}{\omega \frac{m}{Ne^2}}. \qquad (8)$$

Это уравнение аналогично известному выражению для тока, протекающего через индуктивность:

$$I = \frac{V}{\omega L}. \qquad (9)$$

Следовательно, колеблющиеся электроны будут оказывать такое же влияние, как и эквивалентная индуктивность величиной $\frac{m}{Ne^2}$, шунтирующая конденсатор.

Эквивалентная емкость такого конденсатора

$$C' = \varepsilon_0 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m}, \qquad (10)$$

т. е. соответствует конденсатору, заполненному диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, отличной от ε_0:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m}. \qquad (11)$$

Таким образом, наличие свободных электронов в газе приводит к изменению диэлектрической проницаемости, а следовательно, и преломляющих свойств газа. При этом диэлектрическая проницаемость ионизированного газа всегда меньше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха, и зависит от электронной плотности. Диэлектрическая проницаемость зависит также от частоты электромагнитных колебаний. Поэтому ионосфера оказывает неодинаковое влияние на распространение радиоволн различных диапазонов. Для волн короче 10 *м* ионосфера почти прозрачна, тогда как волны длиннее 1 000 *м* отражаются от нее так же хорошо, как от поверхности Земли.

Во время движения электроны могут сталкиваться с молекулами и атомами газа. Электрон, столкнувшись с молекулой, отдает ей накопленную энергию. Молекула получает добавочную скорость. Но движение молекул не создает тока, а является тепловым движением. Таким образом, при прохождении волны в ионизированном газе часть ее энергии затрачивается на повышение температуры газа. Следовательно, энергия радиоволны при прохождении ионосферы уменьшается и тем больше, чем длиннее волна.

Электронная плотность по высоте ионосферы меняется, причем имеется несколько более или менее выраженных максимумов ионизации. Следовательно, на различных высотах в ионосфере получаются как бы слои с неодинаковой степенью ионизации. Самый нижний ионизированный слой принято обозначать буквой D, а более высокие — буквами E, F_1 и F_2. Эти слои по-разному влияют на распространение радиоволн различной длины.

До последнего времени сведения об ионосфере получали главным образом путем радиозондирования, осуществляемого с помощью ионосферных станций (рис. 12). Передатчик ионосферной станции посылает импульсы вер-

тикально вверх. Частота заполнения импульсов меняется. Отраженные импульсы принимают и наблюдают на осциллографе. По времени запаздывания импульса определяют, на какой высоте произошло отражение волны данной частоты, и строят высотно-частотные характеристики (рис. 13). Зная, что отражение происходит в том случае, когда

$$\omega^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}, \qquad (12)$$

подсчитывают величину электронной плотности. Этот метод не позволяет исследовать пространство, находящееся выше верхнего ионосферного слоя.

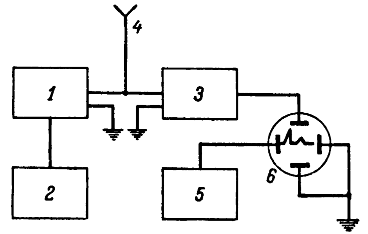


Рис. 12. Блок-схема ионосферной станции.

1 — генератор переменной частоты (1—20 *Мгц*); *2* — модулятор импульсов; *3* — приемник; *4* — антенна; *5* — развертка времени; *6* — индикатор (осциллограф)

Оставалось загадкой, что происходит выше верхнего максимума ионизации, т. е. выше примерно 300 *км*. Полное представление о строении ионосферы было получено только после запуска геофизических ракет. Исследование атмосферы при помощи ракет было начато еще в 30-х годах. Регулярные запуски ракет на высоты до 200 *км* и более стали осуществляться только в последние годы. Особенно большое значение для исследования ионосферы имел запуск ракеты, осуществленный 27 февраля 1958 г. Эта ракета поднялась на высоту 470 *км*, что позволило получить сведения о плотности ионизации на этих высотах.

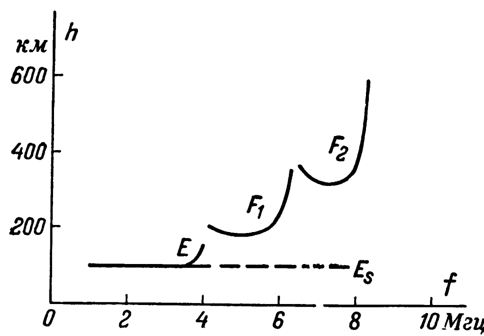


Рис. 13. Высотно-частотные характеристики ионосферы.

Измерение электронной плотности при помощи ракет производят путем наблюдения за прохождением радиоволн через ионосферные слои. Для этого используются УКВ. На ракете устанавливается передатчик, генерирующий основную частоту и гармонику. На советской высотной ракете был установлен передатчик, генерирующий основную частоту 48 *Мгц* и гармонику частотой 144 *Мгц*. На прохождение волны частотой 144 *Мгц* ионосфера не влияет: для нее вся ионосфера практически прозрачна, и волна распространяется со скоростью света в свободном пространстве. Скорость же распространения волны частотой 48 *Мгц* зависит от электронной плотности ионосферы.

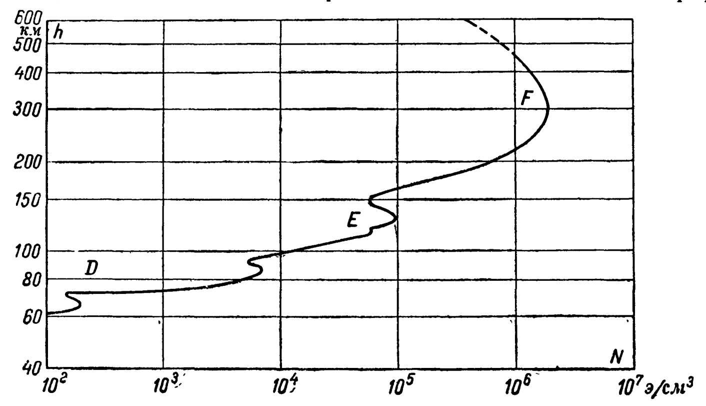


Рис. 14. Зависимость электронной плотности ионосферы от высоты, измеренная при запусках геофизических ракет.

В приемнике частоту сигнала 48 *Мгц* умножают на 4 и смешивают с принятым сигналом на частоте 144 *Мгц*. За счет того, что сигналы распространяются с различными скоростями, они приходят в разной фазе, причем разность фаз зависит от плотности ионизации. Измеряя разность фаз и наблюдая за высотой ракеты, определяют распределение электронной плотности с высотой.

Полученная путем таких измерений зависимость электронной плотности от высоты показана на рис. 14. На этом рисунке высота и электронная плотность отложены в логарифмическом масштабе.

На графике видны три максимума ионизации. Самый верхний, резко выраженный максимум ионизации относится к слою F. Это основной слой, отражающий короткие волны

и обусловливающий возможность связи на коротких волнах на расстояниях в десятки тысяч километров. Второй, меньший максимум, расположенный на высоте 120 *км*, относится к слою E. От этого слоя отражаются средние волны в ночные часы. Самый нижний максимум ионизации находится на высоте 80 *км* и относится к слою D. От этого слоя отражаются длинные волны.

Электронная плотность слоев меняется в зависимости от высоты Солнца, а следовательно, от времени суток и

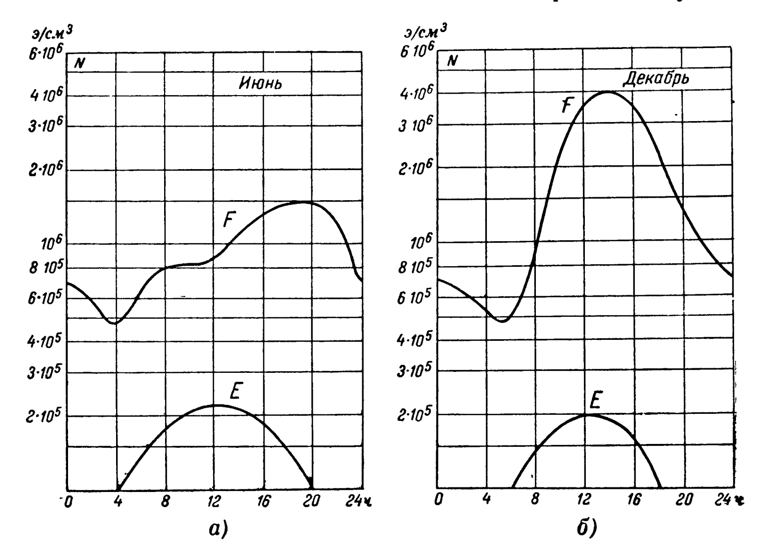


Рис. 15. Изменение электронной плотности ионосферных слоев в течение суток.

а — в летние месяцы; *б* — в зимние месяцы.

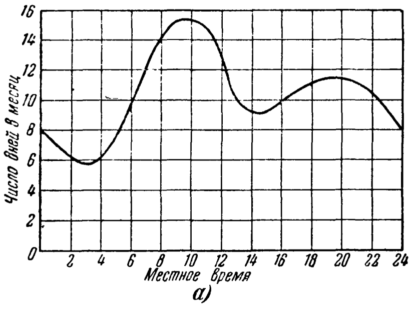
года. Наибольшая плотность наблюдается в полдень для всех слоев, кроме слоя F, летом. Слой F имеет наибольшую плотность в полдень зимой. На рис. 15 показано, как меняется плотность слоев в течение суток.

Электронная плотность слоев, особенно слоя F, меняется от года к году в соответствии с циклами солнечной деятельности. Многолетние наблюдения показали, что деятельность Солнца периодически меняется, причем этот период составляет примерно 11 лет.

Астрономы наблюдали появление на поверхности Солнца темных образований, названных солнечными пятнами, которые долгое время служили критерием деятельности

Солнца. Было установлено, что чем больше площадь, занимаемая солнечными пятнами, тем интенсивнее ультрафиолетовое излучение Солнца, а следовательно, и его ионизирующая способность. Таким образом, в годы, когда число солнечных пятен велико, т. е. в годы максимума солнечной деятельности, плотность ионизации ионосферных слоев значительно увеличивается. В 1957—1958 гг. наблюдался максимум солнечной деятельности.

В ионосфере временами на высоте 90—110 *км* появляется так называемый нерегулярный, спорадический слой E_s. Спорадический слой представляет собой скопление ионизированного газа гораздо большей электронной плотности, чем электронная плотность на той же высоте в окружающей среде. Этот слой появляется над сравнительно небольшой территорией (примерно 100×100 *км*) и может перемещаться под действием господствующих в ионосфере ветров в каком-либо направлении. Скорость перемещения этого слоя примерно 150—250 *км/ч*.



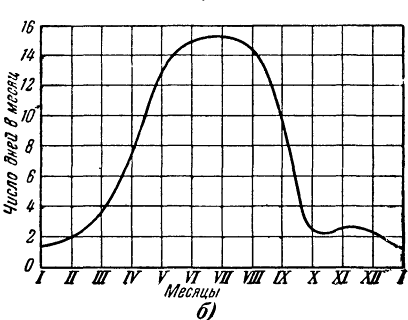


Рис. 16. Число дней в месяце, когда присутствует слой E_s (в средних широтах).

а — зависимость от времени суток (летом); *б* — зависимость от времени года (дневные часы).

Спорадический слой присутствует не всегда. Чаще всего он появляется в дневные часы летом в южных широтах. Так, в экваториальной зоне в дневное время он бывает почти все время. В средних широтах в дневное время летом он присутствует в течение 50—70% времени, т. е. 15—20 дней в месяц. Иногда спорадический слой присутствует в течение всего нескольких часов, а иногда и нескольких минут. Зимой в средних широтах слой E_s появляется редко. Изменение количества случаев появления слоя E_s

в зависимости от времени суток (в летние месяцы) и времени года (в дневные часы) показано на рис. 16. Частота появления и электронная плотность спорадического слоя не зависят от 11-летнего цикла солнечной деятельности. Причины образования этого слоя еще не установлены, поэтому не удается предсказать время и продолжительность его появления. Спорадический слой играет существенную роль в сверхдальнем распространении УКВ.

Выше отмечалось, что ионизированный слой представляет собой неоднородную среду с убывающим по высоте коэффициентом преломления. В таком слое возможно явление полного внутреннего отражения. При этом для отражения более длинных волн нужна меньшая электронная плотность газа. Для слоя определенной электронной плотности существует некоторое критическое значение частоты колебаний. Радиоволны, частота колебаний которых превышает критическую частоту, не отражаются слоем, а проходят, преломляясь, сквозь ионосферу. Кроме того, для данной частоты радиоволны существует некоторое критическое значение угла возвышения луча, при котором при данной электронной плотности слоя радиоволны еще могут отразиться от слоя.

Более 30 лет назад английский ученый Эккерслей установил, что ионосферные слои неоднородны по своей структуре. Они представляют собой как бы скопление облаков ионизированного газа. Местами электронная плотность газа больше, местами — меньше. Размеры этих облаков достигают 50—150 *м*. Поэтому и обнаружить их можно только на коротких и метровых волнах. Облака ионизированного газа непрерывно образуются, рассасываются и находятся в хаотическом движении. Наиболее отчетливо наличие таких неоднородностей выражено на высотах 70—80 *км*.

Радиоволны рассеиваются на неоднородностях ионосферных слоев. При этом рассеянное отражение направлено во все стороны и главным образом в направлении первоначального движения волны. Использование явления рассеяния на неоднородностях ионосферных слоев открыло новые широкие возможности применения УКВ.

Кратковременная ионизация атмосферы происходит при вторжении в нее метеоров. В атмосферу попадает сравнительно мало крупных метеоров, которые могут наблюдаться визуально: всего 2—3 метеора в час на всем земном шаре. Но мелкие пылеобразные частицы весом в доли грамма попадают в атмосферу в большом количестве. Установ-

лено, что суммарная масса метеорных частиц, попадающих в атмосферу в течение суток, равна приблизительно 1 *т*.

Метеорные частицы обладают большими скоростями, значительно превышающими скорость звука. Скорость их относительно земли составляет 13—70 *км/сек*. Попадая в область атмосферы, лежащую на высотах 80—120 *км* над поверхностью Земли, метеоры сталкиваются с молекулами воздуха и сильно нагреваются. Вещество метеора испаряется, и происходит ионизация как молекул воздуха, так и молекул испарившегося вещества метеора. Ионизированные атомы испускают видимый свет, позволяющий в ночное время визуально наблюдать движение самых крупных метеоров.

При движении метеорных тел в земной атмосфере за ними образуется след в виде столба ионизированного воздуха. Ионизированный след имеет форму цилиндра длиной в несколько десятков километров. Первоначально диаметр цилиндра невелик, но затем ионизированный газ начинает рассеиваться, диаметр цилиндра увеличивается, а плотность ионизации в нем уменьшается. При еще достаточно высокой плотности ионизации диаметр ионизированного столба газа может достигать десятков и сотен метров.

От ионизированных следов метеоров отражаются радиоволны, что позволяет наблюдать за метеорами радиолокационным методом. Радиолокационные установки позволяют наблюдать примерно в 100 раз больше метеоров, чем это удается сделать опытному наблюдателю невооруженным глазом. При этом наблюдение метеоров возможно не только ночью, но и днем, а также в пасмурную погоду.

Вращение Земли, наклон ее оси и движение вокруг Солнца вызывают изменение интенсивности метеорного потока от часа к часу и от сезона к сезону. Наибольшая интенсивность потока в северном полушарии—в 6 *ч* утра и особенно в осенние месяцы, а наименьшая — в 6 *ч* вечера весной. Сезонный ход в южном полушарии сдвинут на 6 мес. относительно хода в северном. Однако в некоторые времена года интенсивность метеорного потока резко возрастает из-за возникновения так называемых «метеорных ливней». Явление метеорного ливня наблюдается тогда, когда Земля пересекает потоки частиц, движущихся по хорошо выраженным орбитам вокруг Солнца. Основное значение для радиосвязи имеет ионизация, создаваемая хаотическими метеорными частицами, непрерывно попадающими в атмосферу.

Полярные сияния также являются ионизированными образованиями в атмосфере. Полярные сияния возникают на высоте 80—1 000 *км* над земной поверхностью. Плотность ионизации полярных сияний оказывается достаточной для отражения радиоволн даже метрового диапазона.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

ДИАПАЗОНЫ РАДИОВОЛН

Как известно, радиоволнами называют только те электромагнитные колебания, длины волн которых лежат в пределах 1 *мм*—100 *км*, что соответствует частотам колебаний 3 *кгц*—300 000 *Мгц*. Этот большой диапазон радиоволн условно подразделяют на следующие пять диапазонов:

сверхдлинные волны — волны длиной свыше 10 *км* (частоты ниже 30 *кгц*);

длинные волны—волны 10—1 *км* (частоты 30—300 *кгц*);

средние волны — волны 1 *км*—100 *м* (частоты 300—3 000 *кгц*);

короткие волны—волны 100—10 *м* (частоты 3—30 *Мгц*);

ультракороткие волны — волны 10 *м*—1 *мм* (частоты 30—300 000 *Мгц*).

Радиоволны каждого из этих диапазонов имеют свои особенности распространения. Резких границ изменения условий распространения радиоволн соседних диапазонов нет. Так, например, радиоволна длиной 1 200 *м* распространяется в ряде случаев так же, как радиоволна длиной 800 *м*, а радиоволны длиной 7—8 *м* при определенных условиях распространяются, как короткие волны.

На первом этапе развития радиосвязи использовались главным образом длинные волны. В дальнейшем благодаря успехам радиотехники радиосвязи стали осуществляться на все более коротких диапазонах волн вплоть до миллиметровых. В настоящее время большое практическое значение имеют волны всех диапазонов. В последние годы снова возрос интерес к изучению и использованию длинных и сверхдлинных волн.

СВЕРХДЛИННЫЕ И ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ

Первые передачи на длинных волнах осуществлялись на небольшие расстояния, измеряемые сначала десятками, затем сотнями километров, а в 1901 г. была проведена пер-

вая радиопередача через Атлантический океан. В настоящее время длинные и сверхдлинные радиоволны используются для телеграфной связи на дальние расстояния, для навигации и наблюдения за грозами.

Основным преимуществом длинных волн является большая устойчивость напряженности поля на этих волнах: сила сигнала на линии связи мало меняется в течение суток и в течение года и не подвержена случайным изменениям и нарушениям. Достаточная для приема напряженность поля

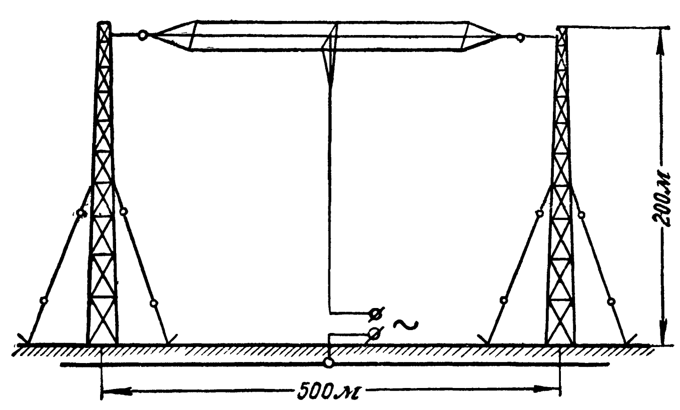


Рис. 17. Антенна длинноволнового диапазона.

может быть обеспечена на расстоянии до 20 000 *км*. Но для этого требуются мощные передатчики, так как в длинноволновом диапазоне невозможно создать эффективно излучающие антенны. Антенны для радиоволн этого диапазона имеют огромные размеры и круговую диаграмму направленности. Вид такой антенны представлен на рис. 17.

У линий связи, работающих на длинных волнах, получается сравнительно малая полоса пропускания радиоканала, что ограничивает возможности использования таких волн для передачи музыки и речи.

Действительно, для высококачественной радиовещательной передачи необходима ширина полосы канала около 10 *кгц*. Таким образом, во всем диапазоне длинных и сверхдлинных волн можно разместить менее 30 каналов. Для передачи телеграфных сигналов необходима ширина полосы канала 1—3 *кгц*, что позволяет разместить в данном диапазоне несколько сотен каналов.

Устойчивость поля на длинных волнах объясняется тем, что их распространение на большие расстояния происходит за счет отражения от слоев D и E, в которых электронная плотность не подвержена быстрым изменениям. Поэтому такие волны успешно используются для дальней радиопеленгации.

Расстояние между землей и нижней границей ионосферы составляет 60—100 *км*, т. е. имеет тот же порядок, что

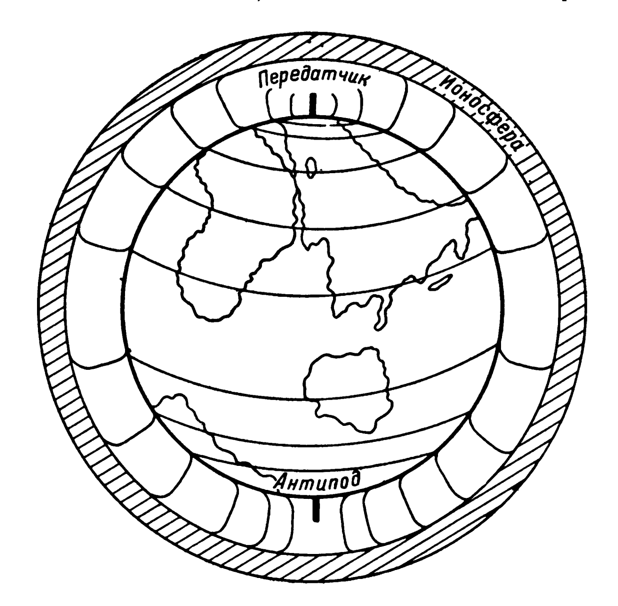


Рис. 18. Распространение длинных и сверхдлинных волн в сферическом волноводе между Землей и ионосферой.

и длина волны длинных и сверхдлинных волн. Эти волны распространяются между двумя концентрическими сферами, одной из которых является Земля, а второй — ионосфера (рис. 18). Условия распространения при этом примерно такие же, как в волноводе, где волны распространяются между двумя поверхностями. В этом случае, как и во всяком волноводе, радиоволны некоторой длины распространяются с наименьшим затуханием. Такие волны называют оптимальными, а волны, имеющие максимальную длину, при которой еще происходит их распространение, — критическими. Для волновода, образованного Землей и ионосфе-

рой, оптимальными являются волны длиной 25—35 *км*, а критической — волна длиной около 100 *км*.

На длинных и сверхдлинных волнах наблюдается интересное явление, называемое «эффектом антипода». Обычно с увеличением расстояния от передающей антенны напряженность поля убывает. Однако в районах, соответствующих антиподным точкам (относительно передающей станции), отмечается значительное увеличение силы сигнала. Это явление объясняется следующим образом. Вся электромагнитная энергия, излученная антенной, оказывается заключенной между двумя сферами и распространяется в пространстве между ними по всем направлениям. С удалением от антенны радиус зоны, на которую приходят волны, увеличивается, пока он не станет равным радиусу земного шара, а затем уменьшается. Таким образом, площадь, на которую попадает излученная энергия, сначала возрастает, а затем уменьшается. Следовательно, плотность энергии и напряженность поля с удалением от передающей антенны убывают, пока расстояние не станет равным четвертой части окружности земного шара, а затем возрастают до максимума на расстоянии, равном половине окружности земного шара, т. е. в районе антипода.

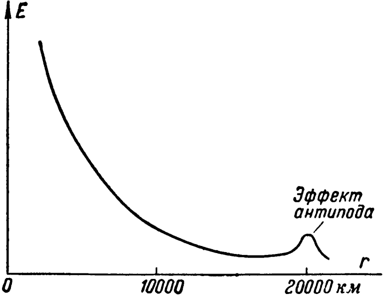


Рис. 19. Зависимость напряженности поля длинных волн от расстояния.

Так как земная поверхность и ионосфера не являются идеальными проводниками, то часть энергии волны проникает в глубь Земли и ионосферы и поглощается в них, что приводит к потерям энергии, т. е. затуханию. В результате действия двух факторов — «эффекта антипода» и затухания — напряженность поля на длинных волнах изменяется с расстоянием по закону, изображенному на рис. 19. На расстоянии 24 000 *км* от передатчика отмечается увеличение напряженности поля.

Длинные и особенно сверхдлинные волны мало поглощаются при прохождении в толщу суши или моря. Так, волны длиной 20—30 *км* могут проникать в глубину моря на несколько десятков метров и, следовательно, могут быть использованы для связи с подводными лодками. Для иссле-

дования условий распространения сверхдлинных радиоволн используются грозы.

Грозовой разряд представляет собой импульс тока, т. е. содержит колебания различных частот от сотен герц до десятков мегагерц. Основная часть энергии грозового импульса приходится на диапазон колебаний, соответствующих сверхдлинным волнам. Колебания от места их возникновения распространяются во все стороны, причем волны различных длин распространяются, испытывая различные затухания, и приходят в разных фазах. В результате импульс, принятый на значительном расстоянии от места возникновения грозового разряда, получается искаженным. Изучая формы таких импульсов, можно определить свойства сферического волновода земля — ионосфера, в котором распространяются длинные волны. Кроме того, с помощью специальных приборов — «пеленгаторов гроз» — можно вести наблюдение за направлением прихода грозы.

СРЕДНИЕ ВОЛНЫ

Средние волны (1 000—100 *м*) используются главным образом для радиовещания. В этом диапазоне удается разместить сравнительно большое количество каналов для передачи речи и музыки. Напряженность поля на средних волнах устойчива только на расстояниях 300—400 *км* от передатчика. На такие расстояния волны распространяются поверхностной волной, и изменения ионосферы практически не оказывают влияния на изменение напряженности поля. На большие расстояния средние волны распространяются пространственной волной путем отражения от ионосферы. Для отражения средних волн необходима бо́льшая электронная плотность, чем для отражения длинных волн. Поэтому средние волны проникают через слой D и отражаются от слоя E, проникая в глубь него. При прохождении слоя D средние волны претерпевают сильное поглощение. Поэтому днем, когда слой D присутствует, напряженность поля пространственной волны на средних волнах оказывается недостаточной для приема и в дневные часы возможен прием только поверхностной волны. В ночное время слой D исчезает и средние волны беспрепятственно проходят, отражаясь от слоя E. Поэтому в ночные часы возможен прием средних волн на больших расстояниях. Это явление хорошо известно всем радиолюбителям. С наступлением вечера можно принимать передачи более удаленных вещательных

станций, днем же возможен прием сигналов только близко расположенных станций.

На средних волнах напряженность поля неустойчива, наблюдаются периодические изменения напряженности, называемые замираниями. Это объясняется тем, что в месте приема, т. е. на некотором расстоянии от передающей антенны, поверхностная и пространственная волны складываются, причем фазы этих волн оказываются различными, так как они приходят разными путями (рис. 20). В результате сложения (интерференции) этих волн в зависимости от разности их фаз уровень сигнала может меняться в широких пределах.

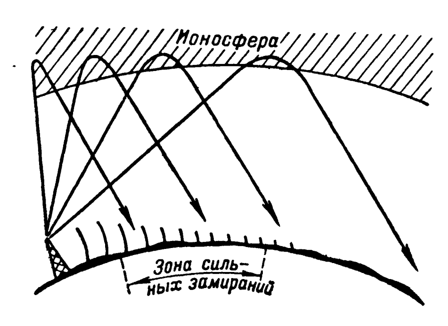


Рис. 20. Схема распространения средних волн.

Ионосфера является неустойчивой средой, электронная плотность в слоях ионосферы непрерывно изменяется; при этом изменяется и высота отражения, а, следовательно, и длина пути волны и фаза отраженной волны. Из-за изменения фазы пространственной волны получается разность фаз интерферирующих волн и уровень сигнала изменяется, что мешает устойчивой связи. Замирания наблюдаются на тех расстояниях, где интенсивности поля поверхностной и пространственной волн примерно одинаковы.

Изменение напряженности поля поверхностной и пространственной волн в зависимости от расстояния до передатчика показано на рис. 21. На участке между точками *А* и *Б* возможно появление замираний.

Для борьбы с замираниями применяют антенны специальных типов. Вид такой антенны изображен на рис. 22,*а*, а ее диаграмма направленности — на рис. 22,*б*. Антенны такого типа имеют диаграмму направленности сравнительно узкую в вертикальной плоскости. Благодаря этому отсутствуют волны, направленные под большими углами к земле, т. е. те волны, которые могут попасть в зону, где напряженность поля поверхностной волны велика. Изменение напряженности поля пространственной волны с расстоянием при использовании специальной антенны показано пунктирной линией на рис. 21. Из этого

рисунка следует, что при использовании специальной антенны зона, где напряженности поля поверхностной и пространственной волн равны, отодвигается в область слабых полей.

На средних волнах иногда наблюдается явление, называемое перекрестной модуляцией. Оно выражается в том, что во время приема какой-нибудь дальней радиостанции

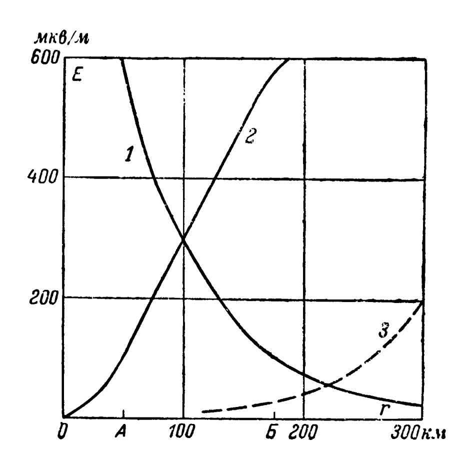


Рис. 21. Изменение напряженности поля пространственной и поверхностной волн в диапазоне средних волн.

1 — кривая изменения напряженности поля поверхностной волны; 2 — кривая изменения напряженности поля пространственной волны; 3 — кривая изменения напряженности поля пространственной волны, создаваемого антенной со специальной диаграммой направленности.

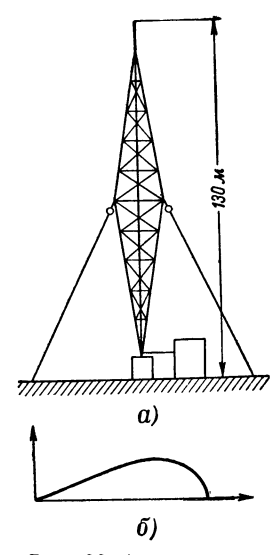


Рис. 22. Антенна средневолнового диапазона (*а*) и ее диаграмма направленности (*б*).

прослушиваются сигналы другой, мощной станции, значительно отличающейся по длине волны от принимаемой. Такие помехи впервые были обнаружены от Люксембургской радиостанции. Перекрестная модуляция наблюдалась также в г. Горьком со стороны мощных московских радиостанций.

Исследования показали, что такая модуляция возникает за счет нелинейных свойств ионосферы. Под действием электрического поля электроны в ионосфере приобретают скорость, пропорциональную напряженности поля. Если сигнал промодулирован по амплитуде, т. е. амплитуда напряженности поля сигнала изменяется по некоторому

закону, соответствующему передаваемой речи, то по этому же закону окажется промодулированной скорость движения электронов. Чем быстрее движутся электроны, тем чаще происходят столкновения их с молекулами. Во время столкновений электрон передает молекуле накопленную энергию, которую он получил от электромагнитного поля. Таким образом, энергия электромагнитных колебаний переходит в энергию теплового движения молекул, т. е. происходят потери энергии. Понятно, что поглощение, т. е. ослабление напряженности поля, оказывается пропорциональным величине напряженности поля. Но подобное ослабление испытывают не только сама волна мощной станции, но и волны менее мощных станций. Это бывает только в том случае, когда распространение происходит таким образом, что волны менее мощных станций проходят через ту же область ионосферы, что и волны мощной станции. В этом случае сигнал маломощной станции ослабляется пропорционально изменению напряженности поля мощной станции, т. е. происходит модуляция слабого сигнала модулирующим напряжением мощной станции.

За счет перекрестной модуляции в приемник часто проникают интенсивные грозовые помехи, которые невозможно отфильтровать, так как грозовой разряд модулирует принимаемый сигнал. Например, если над Киевом происходит гроза, то в Москве оказывается затрудненным прием передач Пражской станции.

КОРОТКИЕ ВОЛНЫ

До 20-х годов, когда еще не было выяснено влияние ионосферы на распространение радиоволн, считали, что все волны короче 200 *м* непригодны для радиосвязи на большие расстояния. Поэтому весь этот диапазон был передан радиолюбителям. Естественно, что, основываясь на таком ошибочном представлении, и радиолюбители тоже старались работать на волнах как можно ближе к 200 *м*.

Однако со временем многие радиолюбители стали работать на более коротких волнах, и к всеобщему удивлению условия радиосвязи на этих волнах оказались лучше. После выяснения преимуществ коротких волн было организовано новое распределение частот между радиостанциями всех стран мира.

В 20-х годах началось широкое использование коротких радиоволн для дальней связи. В 1924 г. под руководством советского ученого М. А. Бонч-Бруевича в Нижегород-

ской (Горьковской) радиолаборатории проводились первые в Советском Союзе опыты по связи на коротких волнах, закончившиеся организацией линии радиосвязи Москва—Ташкент, а в 1925 г. проводились такие же работы на линии Ленинград—Тбилиси.

В настоящее время короткие волны применяются главным образом для связи и вещания на расстояния, достигающие тысяч километров, причем передатчики могут иметь небольшую мощность.

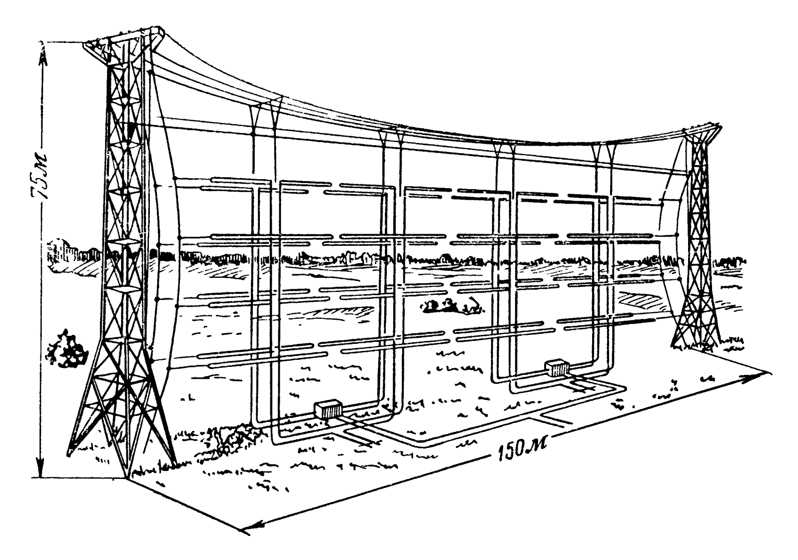


Рис. 23. Антенна коротковолнового диапазона.

На коротких волнах можно создать направленные антенны, т. е. сконцентрировать излучаемую энергию в нужном направлении. Вид коротковолновой антенны показан на рис. 23. Короткие радиоволны распространяются на большие расстояния путем отражения на уровне слоя F ионосферы и от поверхности земли, проходя при этом через слои D и E, в которых они претерпевают поглощение. Схема распространения коротких волн приведена на рис. 24.

Для того чтобы волна могла быть принята на определенном расстоянии от передатчика, должны быть выполнены два условия: во-первых, должны быть выполнены условия отражения волны от ионосферы и, во-вторых, напряженность поля в данном месте должна быть достаточной для

приема, т. е. поглощение энергии волны в слоях ионосферы не должно быть слишком большим. Эти два условия обычно ограничивают диапазон применяемых рабочих частот.

Для того чтобы произошло отражение, необходимо, чтобы рабочая частота была не слишком высокой, т. е. электронная концентрация слоя оказалась достаточной для отражения радиоволны. Из этого условия выбирается максимальная рабочая частота, являющаяся верхней границей диапазона.

Второе условие ограничивает рабочий диапазон частот снизу. Чем ниже рабочая частота (в пределах коротковолнового диапазона), тем сильнее поглощение энергии волны в ионосфере. Так как электронная плотность ионосферы меняется в течение суток и года, то изменяются и верхняя и нижняя границы рабочего диапазона. Это приводит к необходимости изменения длины волны. На одной и той же линии связи днем и ночью приходится работать на разных волнах. Днем работают на волнах 10—25 *м*, а ночью — 35—100 *м*. Необходимость менять длину волны и каждый раз правильно выбирать волну усложняет аппаратуру и оборудование радиостанций, а также работу оператора.

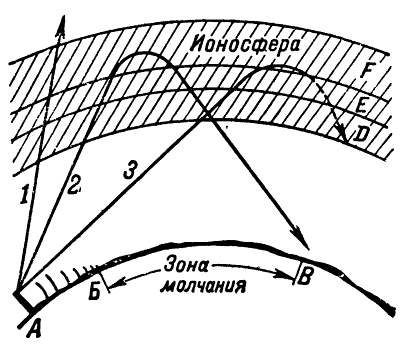


Рис. 24. Схема распространения коротких волн.

Увеличение поглощения в дневные часы по сравнению с ночными проявилось при приеме в Антарктиде европейских коротковолновых станций. Советские операторы, работающие на радиостанции поселка «Мирного», отмечали изменение направления прихода наиболее сильного сигнала коротких радиоволн в течение суток. Радиоволны всегда проходили по не освещенной Солнцем стороне земного шара, хотя в течение части суток (когда освещено восточное полушарие) этот путь является более длинным. Волна, проходящая по освещенной части земного шара, почти полностью поглощалась в ионосфере.

Еще в первые годы использования коротких радиоволн было обнаружено, что на волнах короче 50 *м* прием сигна-

ла оказывался невозможным на расстояниях около 100 *км* и слышимость была исключительно хорошей на расстояниях в несколько тысяч километров. Область, в которой прием сигнала невозможен, была названа «зоной молчания». Наличие зоны молчания объясняется тем, что короткие волны, распространяющиеся вблизи земной поверхности, плохо огибают земной шар и сильно поглощаются земной поверхностью, так что уже на расстоянии около 100 *км* напряженность поля оказывается недостаточной для приема. На рис. 24 показано, что волна, распространяющаяся вдоль поверхности земли из точки *А*, может быть принята только на участке *АБ*. В то же время от ионосферы могут отражаться короткие волны только в том случае, если они падают достаточно полого на ионосферный слой. Такие волны, отражаясь, проходят большое расстояние и попадают в точку *В* и дальше, а на меньших расстояниях от передающей станции эти волны на поверхность земли не приходят.

В результате на некоторой части трассы *БВ* прием радиоволн невозможен; этот участок называется зоной молчания. Чем короче волна, тем шире зона молчания.

Наличие зон молчания часто отмечается радиолюбителями-коротковолновиками. Им известно, что хорошо налаживается связь с корреспондентом, удаленным на 2 000—3 000 *км,* и невозможно осуществить связь с корреспондентом, находящимся на расстоянии 200—300 *км.*

Неприятным явлением при работе на коротких волнах являются замирания. На коротких волнах замирания проявляются более интенсивно, чем на средних. Изменения уровня сигнала получаются более резкими и происходят чаще. Это вызвано тем, что слой F, от которого отражаются короткие волны, менее устойчив, чем слой E, отражающий средние волны. Причиной замираний является то обстоятельство, что в место приема приходит несколько волн, проходящих различные пути, причем длина этих путей меняется. Для того чтобы фаза волны в диапазоне коротких волн изменилась на 180°, длина пути волны должна измениться менее чем на 50 *м.* Такие изменения высоты отражения в ионосфере могут происходить очень часто. Поле в месте приема обычно создается так, как показано на рис. 25, т. е. одна из радиоволн приходит в место приема, испытав одно отражение от ионосферы, а другая — два.

Для борьбы с замираниями применяют различные методы. Применяют, например, приемные антенны с узкой диа-

граммой направленности, ориентированной так, чтобы принималась только волна, пришедшая наиболее коротким путем. Направление прихода волны может меняться в течение суток. Поэтому необходимо предусмотреть возможность изменения направления максимума диаграммы направленности антенны. Такая приемная антенна получается сложной и громоздкой.

Можно эффективно осуществлять прием на разнесенные антенны. Такой прием возможен потому, что увеличение и уменьшение напряженности поля, даже на сравнительно небольшой площади земной поверхности, происходят неодновременно. В то время как в месте расположения одной антенны уровень напряженности поля мал, около другой антенны, удаленной от первой на расстояние в несколько длин волн (сто или несколько сотен метров), напряженность поля велика. Таким образом, на выходе одной из двух антенн напряжение окажется достаточным для приема. При осуществлении такого радиоприема сигналы суммируются по низкой частоте после детектирования.

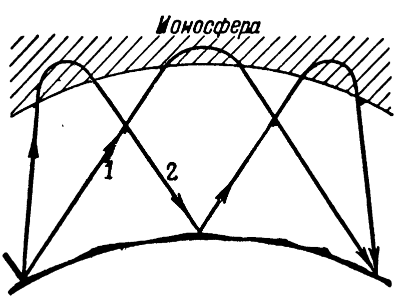


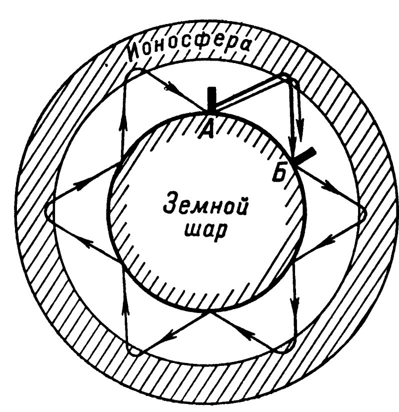
Рис. 25. Различные пути распространения коротких волн.

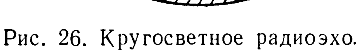
1 — волна приходит в точку приема, испытав одно отражение от ионосферы; 2 — волна претерпевает два отражения.

Короткие волны при благоприятных условиях могут распространяться на очень и очень большие расстояния. Нередко наблюдаются случаи, когда короткие волны один или несколько раз огибают земной шар. Сигналы, обогнувшие земной шар, могут быть приняты в том же пункте, где ведется прием основного сигнала (рис. 26). Напряженность поля сигнала, обогнувшего земной шар, достаточно велика для приема, но приходит он с запозданием примерно на 0,1 *сек*. Значит, если не принять специальных мер, то окажутся одновременно принятыми два сигнала: основной и его «эхо». Это явление так и называется «радиоэхо». Особенно сильное мешающее действие «радиоэхо» оказывает на длинных линиях связи, например на линии Москва—Хабаровск, где оно и было подробно исследовано.

Одной из недавно исследованных особенностей распространения коротких волн является дальное наземное рас-

сеяние коротких волн на участках поверхности Земли. Это явление поясняется на рис. 27,*а*. Излучаемые антенной радиопередающего устройства радиоволны *1* отражаются от ионосферы и попадают затем на Землю в точку *Б*. На поверхности Земли всегда имеются значительные неровности (холмы, деревья, строения). Поэтому не вся энергия волны отражается зеркально, а часть ее рассеивается во всех направлениях (*2*, *3*, *4*, *5*). Рассеянные неоднородно-




Рис. 26. Кругосветное радиоэхо.

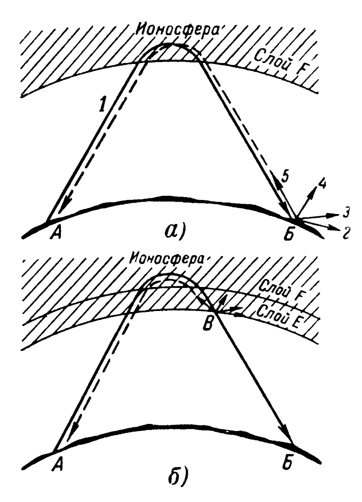


Рис. 27. Дальнее наземное рассеяние коротких волн.

а — действительная схема рассеяния; *б* — ошибочная схема Эккерлея.

стями волны частично вновь отражаются от ионосферы и возвращаются на землю, причем какая-то доля энергии направляется обратно (*5*) в то место, где находится радиопередающее устройство.

Интересна история исследования вопроса о рассеянии коротких волн. Еще в 1926—1930 гг. было замечено, что прием сигналов, изучаемых мощными коротковолновыми станциями, наблюдается в «зоне молчания». Кроме того, были замечены ошибки пеленга коротковолновых станций. Специальные опыты показали, что эти явления объясняются рассеянием радиоволн. Однако до 1946 г. исследователи затруднялись ответить на вопрос, где же происходит это рассеянное отражение. Английский ученый Т. Л. Эккерлей открыл и исследовал рассеяние радиоволн на неоднородностях слоя Е, которое в настоящее время широко используется для дальней связи на метровых волнах. Источником

рассеяния коротких волн Эккерлей также считал слой Е в точке B (рис. 27,*б*). Возможность того, что дальние рассеянные отражения являются результатом рассеяния радиоволн неровностями земной поверхности, Эккерлей категорически отрицал.

Авторитет Эккерлея был настолько велик, что в течение 20 лет никто не был в состоянии опровергнуть его мнение, хотя многие исследователи занимались этим вопросом. Только в 1946 г. советский исследователь Н. И. Кабанов доказал, что дальние возвратные отражения коротких волн обусловлены рассеянием на неоднородностях поверхности Земли, на которую падают короткие волны, отразившиеся от ионосферы.

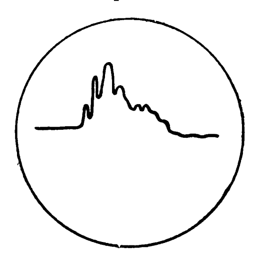


Рис. 28. Осциллограмма возвратно-рассеянного сигнала.

Правильное определение места рассеяния коротких волн позволило использовать рассеянные отражения для определения частот, на которых следует вести связь в данное время. Для этого перед началом основного сеанса передачи несколько минут передают сигнал, промодулированный импульсами. Оператор на специальном осциллографе наблюдает за величиной принятого сигнала, созданного рассеянным отражением. Горизонтальная развертка осциллографа проградуирована в километрах. Вид осциллограммы такого сигнала показан на рис. 28.

Само присутствие сигнала на осциллографе указывает на то, что излучаемые антенной волны проходят, а верхняя граница применимых частот не пройдена. По величине этого сигнала можно судить о напряженности поля в месте приема, а по шкале расстояний можно определить, облучается ли нужная область территории. Такой метод определения рабочей частоты называется методом возвратно-наклонного зондирования — ВНЗ. Метод ВНЗ позволяет быстро и точно выбрать для связи нужную рабочую частоту, что особенно трудно сделать другим способом на протяженных линиях связи. Таким образом, явление рассеяния коротких волн, казавшееся на первых порах вредным, теперь успешно используется для контроля работы радиолиний связи. Система ВНЗ работает на линии связи Москва—Хабаровск.

Проверку прохождения радиоволн методом ВНЗ можно проводить и во время передачи. Это особенно полезно

потому, что связь на коротких волнах подвержена частым нарушениям, причем перерывы связи наступают неожиданно.

Исследования показали, что нарушение радиоприема совпадает во времени с взрывами на Солнце. Во время взрывов с Солнца вылетает большое количество заряженных частиц. Попадая в земную атмосферу, эти частицы вызывают «ионосферную бурю», т. е. разрушают обычное слоистое строение ионосферы и особенно слой F. Короткие волны перестают отражаться от слоя F, и связь нарушается. Связь восстанавливается иногда через несколько минут, а иногда только через несколько часов. Особенно часты такие нарушения связей в приполярных областях. Меры борьбы с ними весьма сложны. Многочисленные нарушения связей на коротких волнах в полярных районах явились одной из причин, побудивших исследователей искать возможности дальней связи на УКВ.

В настоящее время коротковолновый диапазон очень сильно загружен и вопрос о выборе рабочей частоты для строящихся коротковолновых станций является весьма трудным.

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ

Последнее десятилетие отличается все расширяющимся использованием ультракоротких волн. Большой интерес к этому диапазону волн объясняется развитием новых видов радиосвязи: телевидения, радиовещания с частотной модуляцией и др., которые требуют весьма широкой полосы радиоканала. Широкая полоса частот может быть передана только на радиоволнах ультракоротковолнового диапазона. Кроме того, из-за перегрузки коротковолнового диапазона желательно перевести как можно больше линий связи в диапазон УКВ. В настоящее время выяснилась возможность осуществления регулярной связи на УКВ на расстояниях до 1 000 *км* и более.

Такие УКВ линии связи в отличие от коротковолновых могут устойчиво работать в арктических районах. Диапазон УКВ принято подразделять на следующие поддиапазоны: метровые волны (10—1 *м*, 30 *кгц* — 300 *Мгц*), дециметровые волны (1 *м* — 10 *см*, 300 — 3 000 *Мгц*), сантиметровые волны (10 — 1 *см*, 3 000 — 30 000 *Мгц*) и миллиметровые волны (короче 1 *см*).

Волны каждого из этих поддиапазонов находят свое применение в технике. Так, поддиапазон метровых волн используется для телевидения и радиовещания, а в послед-

нее время и для радиосвязи на сверхдальние расстояния. Поддиапазоны дециметровых и сантиметровых волн используются в телевидении, радиолокации и многоканальной связи. Поддиапазон миллиметровых волн еще осваивается. Для радиолюбительских связей выделены волны во всех этих поддиапазонах: в метровом — это волны частотой 144—146 *Мгц*, в дециметровом — 420—425 и 1 470—1 520 *Мгц*, в сантиметровом — 5 650—5 850 *Мгц*.

Волны каждого из поддиапазонов УКВ имеют свои особенности распространения, но все они обладают и некоторыми общими свойствами, характерными для всего диапазона УКВ.

Встречающиеся на практике случаи распространения УКВ можно классифицировать следующим образом:

1. Распространение на небольшие расстояния (до 5—6 *км*), когда можно пренебречь сферичностью земли и считать ее плоской.

2. Распространение на расстояния, не превышающие пределов видимого горизонта (до 50—60 *км*).

3. Распространение на те же расстояния, но в гористой местности или в большом городе, когда на пути распространения волны имеются значительные препятствия.

4. Тропосферное распространение радиоволн, т. е. распространение под влиянием нижних слоев атмосферы (на расстояния 200—600 *км*).

5. Ионосферное распространение радиоволн, вызываемое особым влиянием верхних, ионизированных слоев (на расстояния свыше 1 000 *км*).

6. Связь на УКВ с использованием в качестве ретранслятора Луны и искусственных спутников Земли.

В соответствии с этой классификацией в следующих главах рассмотрены особенности распространения УКВ.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ НА РАССТОЯНИЯ, МЕНЬШИЕ И БЛИЗКИЕ К РАССТОЯНИЮ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

РАССТОЯНИЯ, МНОГО МЕНЬШИЕ ДАЛЬНОСТИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

До последнего времени УКВ применялись для передачи на сравнительно небольшие расстояния — в пределах прямой видимости. За этим пределом напряженность поля

УКВ обычно резко уменьшается, так как дифракция в этом диапазоне сказывается значительно слабее, чем на более длинных волнах. Для увеличения дальности действия передач на УКВ антенны поднимают возможно выше над землей. Зная высоту, на которую подняты передающие и приемные антенны, можно на основании простых геометрических соображений легко определить расстояние прямой видимости (рис. 29).

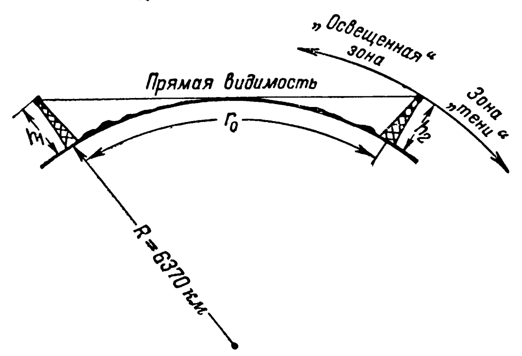


Рис. 29. К определению расстояния прямой видимости.

Расстояние прямой видимости (в километрах) может быть вычислено по формуле

$$r_0 = \sqrt{2R}\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 3{,}57\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \qquad (13)$$

где R — радиус земного шара (6 370 000 *м*);
h_1 — высота передающей антенны, *м*;
h_2 — высота приемной антенны, *м*.

Для определения расстояния прямой видимости может быть использован график на рис. 30, где по оси абсцисс отложены величины высоты приемной антенны h_2, а по оси ординат — расстояние прямой видимости r_0; на кривых обозначены высоты расположения передающих антенн h_1.

Например, если при приеме передач Московского телецентра, антенна которого поднята на высоту 150 *м*, применяется приемная антенна, расположенная на высоте 5 *м*, то предел прямой видимости составит 59 *км*. Если же приемную антенну поднять на высоту 50 *м*, то предел прямой видимости увеличится до 80 *км*.

Первые исследования в области УКВ были направлены на выяснение условий их распространения в пределах прямой видимости на небольшие расстояния, когда на пути распространения волн нет гор, больших зданий и других существенных препятствий.

Впервые ответ на вопрос, как рассчитать напряженность поля УКВ и от чего она зависит, дал в 1922 г. Б. А. Введенский. Первые опыты проводились им на вол-

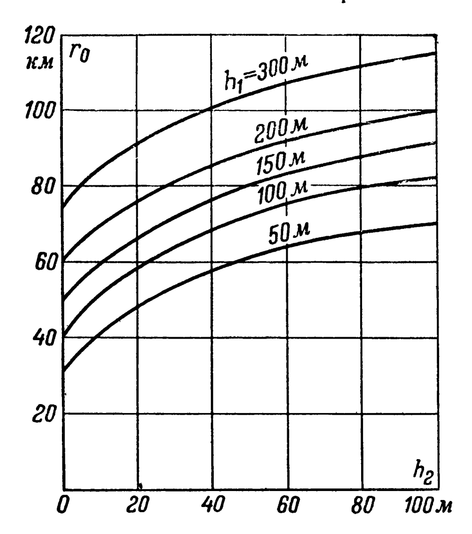


Рис. 30. График для определения расстояния прямой видимости.

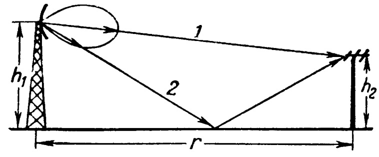


Рис. 31. Схема распространения УКВ на небольшие расстояния.

1 — прямая волна, *2* — волна, отраженная от поверхности Земли.

не длиной 3,8 *м* на расстоянии в десятки метров. Б. А. Введенский показал, что на небольших расстояниях в любой точке поле складывается из двух волн: прямой и отраженной от земной поверхности. Даже если применяются остронаправленные антенны, имеет место волна, отраженная от Земли (рис. 31). При небольших расстояниях можно не учитывать кривизны земной поверхности и считать Землю плоской.

В зависимости от того, насколько различаются длины путей прямого и отраженного лучей, результирующее поле может оказаться больше или меньше поля каждой из составляющих. При небольших высотах антенны по сравнению с длиной трассы (этот случай обычно имеет место на практике) фаза волны при отражении от земной поверхности меняется на 180°. Таким образом, если разность длин путей прямого и отраженного лучей мала (меньше полуволны) или составляет целое число волн, поля вычитаются. Если же разность путей составляет целое число полуволн, то поля складываются.

Поле имеет в этом случае интерференционный характер. Напряженность поля убывает с увеличением расстояния или высоты над земной поверхностью, периодически то увеличиваясь, то уменьшаясь. В результате характеристика направленности антенны в вертикальной плоскости носит лепестковый характер (рис. 32). Если приемную антенну поднимать выше линии, совпадающей с направлением максимального излучения первого лепестка передающей антенны, то напряженность поля начнет уменьшаться с

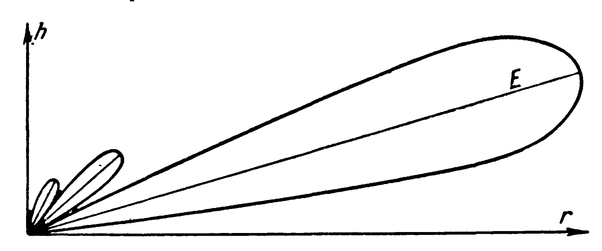


Рис. 32. Лепестковая диаграмма направленности антенны, получающаяся в результате интерференции прямой и отраженной волн.

поднятием приемной антенны над земной поверхностью. Поднимать антенну выше, чем $h_{2\text{макс}}$, нецелесообразно.

$$h_{2\text{макс}} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{r}{h_1}. \qquad (14)$$

Для расчета напряженности поля УКВ в том случае, когда приемная антенна расположена не на слишком большой высоте, так что она находится в области, соответствующей нижней части первого лепестка. Б. А. Введенский предложил простую формулу, называемую отражательной:

$$E = \frac{2,18\sqrt{PD}h_1h_2}{r^2\lambda}, \qquad (15)$$

где E — действующее значение напряженности поля в месте приема, *мв/м*;

P — мощность, излучаемая антенной, *квт*;

D — коэффициент направленного действия антенны по сравнению с ненаправленным излучателем (величина безразмерная);

h_1 и h_2 — высоты передающей и приемной антенн, *м*;

r — расстояние вдоль земной поверхности, *км*;

λ — длина рабочей волны, *м*.

Формула (15) является основной для расчетов ультракоротковолновых линий связи и размещения вещательных станций для расстояний, не превышающих предела прямой видимости. Она дает наглядную зависимость напряженности поля от длины волны, высот антенн и расстояния. Из этой формулы видно, что для увеличения напряженности поля следует выше поднимать передающую и приемную антенны. Напряженность поля тем больше, чем короче волна. Напряженность поля с увеличением расстояния убывает по квадратичному закону.

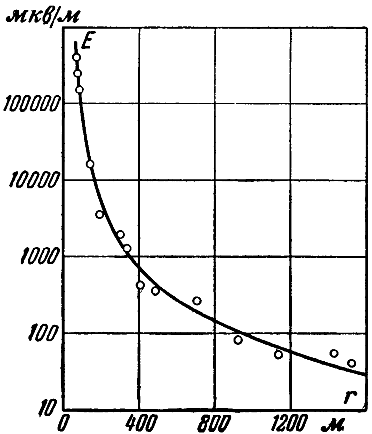


Рис. 33. Сопоставление расчетных значений напряженности поля с данными измерений, проводившихся на ровной местности.

Необходимо отметить, что формула (15) справедлива только для случая, когда антенны подняты достаточно высоко. Легко видеть, что если одна из антенн расположена на земной поверхности, т. е. h_1 или h_2 равно нулю, то напряженность поля равна нулю, что не соответствует действительности. Для этого случая формула (15) неприменима.

Эта формула неприменима также для очень больших высот поднятия антенн. Применимость ее в этом случае ограничена условием

$$h_2 \leqslant \frac{r\lambda}{18h_1}. \qquad (16)$$

Экспериментальная проверка справедливости формулы (15) производилась измерением напряженности поля вдоль пути распространения волн. На рис. 33 приведены результаты измерений напряженности поля в сопоставлении с расчетной кривой. Измерения проводились над ровной местностью на волне длиной 7,25 *м*. Высоты передающей и приемной антенн были соответственно 29 и 3,1 *м*. Результаты измерений отмечены точками. Линией нанесены результаты расчетов по формуле (15). Из рассмотрения рисунка следует, что расхождение между экспериментом и рас-

четом невелико. На небольших расстояниях сигнал, переданный на УКВ, получается сильным, устойчивым и не меняется в течение года и суток, что обеспечивает надежную радиосвязь

РАССТОЯНИЯ, БЛИЗКИЕ К ПРЕДЕЛУ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

При увеличении расстояния нельзя пренебрегать влиянием кривизны земной поверхности. На рис. 34 изображена схема распространения УКВ для расстояний, при которых необходимо уже учитывать сферичность Земли.

Из схемы видно, что если в точке отражения радиоволн от земной поверхности провести плоскость, касательную к земному шару, и отсчитывать высоты антенн от этой плоскости, а не от поверхности Земли, то получим ту

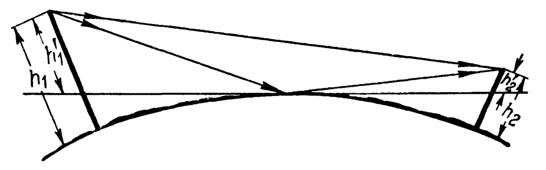


Рис. 34. Схема распространения УКВ для расстояний, при которых необходим учет сферичности поверхности Земли.

же схему распространения волн, что и в случае плоской земли. Разность хода лучей определится таким же образом, как и раньше. Следовательно, для определения напряженности поля в этом случае в формулу (15) вместо действительных высот антенн h_1 и h_2 следует подставлять так называемые приведенные высоты h_1' и h_2', равные расстоянию от точки подвеса антенны до плоскости, касательной в точке отражения. Величины приведенных высот определяются из геометрических соображений.

При расчете напряженности поля по формуле (15) предполагалось, что волны распространяются прямолинейно. В действительности под влиянием неоднородности тропосферы происходит рефракция волн, что затрудняет вычисление разности ходов прямой и отраженной волн.

Так как формула (15) проста, наглядна и хорошо проверена опытом, то оказалось целесообразным ввести в нее некоторые дополнения для учета явления рефракции. С этой целью было введено понятие эквивалентного радиуса земного шара, которое позволило приближенно учесть явление атмосферной рефракции.

На рис. 35 изображены сферическая поверхность Земли и расположенная над ней антенна. Излученная волна распространяется по некоторой кривой и в точке приема находится на расстоянии *АБ* от поверхности Земли. Представим себе, что волна распространяется не по кривой линии, а по прямой. Для того чтобы она проходила при этом на той же высоте над поверхностью Земли, нужно, чтобы изменился радиус земного шара, т. е. заменить действительный радиус земного шара эквивалентным.

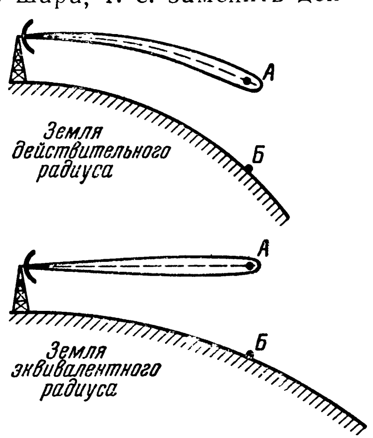


Рис. 35. Учет влияния рефракции путем замены действительного радиуса Земли эквивалентным радиусом.

Из геометрических соображений можно найти зависимость между кривизной траектории и эквивалентным радиусом земного шара. Кривизна траектории зависит от того, насколько изменяется коэффициент преломления атмосферы при подъеме на единицу высоты, например 1 *м*. Следовательно, от изменения коэффициента преломления атмосферы с высотой зависит и эквивалентный радиус земного шара R'. Если траектория волны в атмосфере обращена выпуклостью вверх, т. е. волна возвращается на Землю, то эквивалентный радиус земного шара оказывается больше действительного радиуса. Кажущееся увеличение радиуса земного шара учитывается коэффициентом k:

$$k = \frac{R'}{R}. \tag{17}$$

Коэффициент k следующим образом связан с коэффициентом преломления атмосферы:

$$k = \frac{1}{1 - 6,37 \cdot 10^6 \Delta n}, \tag{18}$$

где Δn — изменение коэффициента преломления атмосферы при поднятии на 1 *м*.

Понятие эквивалентного радиуса применимо не только тогда, когда коэффициент преломления изменяется по

высоте линейно независимо от рассматриваемой высоты, т. е. Δn — величина постоянная для всех высот. Использование для расчетов эквивалентного радиуса земного шара дает усредненные величины и обеспечивает получение хороших результатов даже при отклонении закона изменения коэффициента преломления с высотой от линейного.

Как уже отмечалось, под влиянием атмосферной рефракции траектория волны из прямолинейной становится криволинейной. При этом в случае нормальной рефракции волна проходит на одной и той же высоте над Землей на сравнительно большом расстоянии. Таким образом, при тех же высотах антенн дальность прямой видимости увеличивается.

В случае нормальной рефракции при $k = 4/3$ дальность прямой видимости (в километрах) определится как

$$r_0 = \sqrt{2Rk}\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4{,}12\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \qquad (19)$$

т. е. под действием рефракции дальность прямой видимости возрастает на 15% [ср. с формулой (13)].

В формуле (15) увеличение радиуса кривизны поверхности Земли учитывается в изменении приведенных высот антенны. При этом, как видно из рис. 34, приведенная высота увеличивается, а следовательно, увеличивается и напряженность поля в точке приема. В случае стандартной атмосферной рефракции, когда $\Delta n = 4 \cdot 10^{-8}$ *м*, эквивалентный радиус земного шара в $k = 4/3$ раза больше действительного радиуса. В расчетах обычно и принимают эту величину k, если только специальные измерения не показали, что коэффициент преломления атмосферы изменяется с высотой как-то иначе.

Увеличение напряженности поля на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, наблюдается в действительности. Учет влияния рефракции описанным выше образом дает хорошее совпадение с опытными данными.

Наблюдения за распространением УКВ показывают, что напряженность поля на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, непостоянна. Напряженность поля меняется в зависимости от времени года, времени суток, ото дня ко дню. Кроме таких длительных колебаний, наблюдаются быстрые колебания в течение нескольких секунд или минут. Эти колебания называются замираниями.

Медленные колебания напряженности поля вызываются изменениями метеорологических условий. Меняются условия рефракции, кривизна траектории луча, а следователь-

но, и разность фаз прямой и отраженной волн. Быстрые колебания вызываются флуктуацией преломляющих свойств атмосферы. Под действием местного нагрева и движений в тропосфере преломляющие свойства атмосферы меняются — флуктуируют.

Измерения показали, что замирания на разных частотах не совпадают во времени. При приеме телевизионных передач на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, наблюдаются периоды хорошего прохождения сигнала изображения и почти полного пропадания звукового сопровождения или наоборот.

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Представление о гладкой поверхности Земли всегда является условным. Обычно она далеко не ровная, и на пути распространения радиоволны встречаются различные препятствия: холмы, деревья, постройки и т. п. На рис. 36,*а*

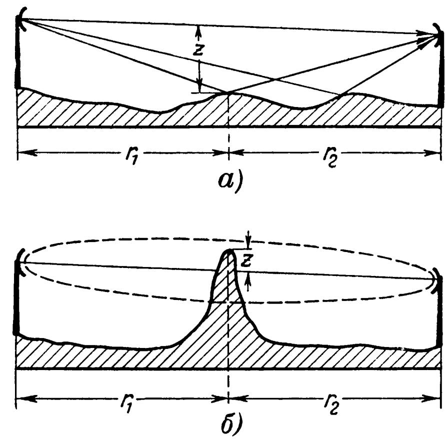


Рис. 36. Распространение радиоволн над неровной земной поверхностью. *а* — открытая трасса; *б* — закрытая трасса.

показана линия связи, проходящая над неровной местностью, когда неровности местности лежат ниже прямой, соединяющей передающую и приемную антенны. Такая трасса называется открытой. В этом случае в точку приема могут приходить прямая волна и несколько (в данном случае две) волн, отраженных от поверхности земли, причем напряженность поля отраженных волн имеет раз-

личные фазы. В этом случае результирующая напряженность поля получается иной, чем при распространении волны над ровной поверхностью Земли, когда имеется лишь одна отраженная волна.

Другой профиль неровной местности изображен на рис. 36,*б*, когда препятствие закрывает линию прямой видимости. Такая трасса называется закрытой. За препятствием образуется область тени, но за счет дифракции (огибания волнами препятствия) некоторая напряженность поля создается и в области тени.

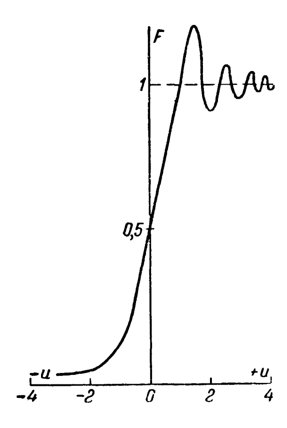


Рис. 37. График для определения множителя ослабления напряженности поля за препятствием.

Рассмотренные выше формулы хорошо согласуются с опытом в том случае, когда поверхность Земли можно рассматривать как гладкую сферу. Если на пути распространения волны имеется одно явно выраженное препятствие — холм или высокое здание, то напряженность поля можно оценить, проведя расчет согласно дифракционной теории.

Приближенно напряженность дифракционного поля за препятствием можно вычислить по формуле, предложенной А. Н. Щукиным:

$$E = E_0 F, \qquad (20)$$

где E_0 — напряженность поля в свободном пространстве, определяемая по формуле (4);

F — множитель ослабления, для определения которого можно воспользоваться графиком на рис. 37.

Параметр u (рис. 37) зависит от высоты «просвета» z (рис. 36), определяемого как расстояние между линией прямой видимости и вершиной препятствия. Для открытой трассы z считается положительным, а для закрытой трассы — отрицательным. Кроме того, параметр u зависит от расстояния от передатчика до препятствия r_1 и от препятствия до приемника r_2, а также от длины волны λ:

$$u = z \sqrt{\frac{2(r_1 + r_2)}{r_1 r_2 \lambda}}. \qquad (21)$$

Из рассмотрения графика на рис. 37 следует, что чем более закрыта трасса, тем меньше напряженность поля.

Ослабляющее действие препятствия сказывается и тогда, когда вершина препятствия находится ниже линии прямой видимости. Это объясняется тем, что волны от передатчика к приемнику распространяются как бы по фиктивному каналу, радиус которого a зависит от меньшего из расстояний r_1 или r_2 и от длины волны:

$$a \approx \sqrt{\frac{r_1 \lambda}{2}}. \qquad (22)$$

Такой канал схематически изображен пунктиром на рис. 36. Экранирующее действие препятствия сказывается тогда, когда оно начинает перекрывать поперечник канала. С другой стороны, пока не перекрыт весь поперечник канала, напряженность поля остается значительной. Представление о канале, по которому распространяются радиоволны, позволяет более правильно оценить влияние неровностей и препятствий на работу линии связи.

В реальных условиях на пути распространения волны встречается много препятствий, различных по размерам и не имеющих строгой геометрической формы: холмы, деревья, строения и т. п. В этом случае расчет напряженности поля с учетом влияния всех этих препятствий и неровностей практически невозможен. Когда, например, проектируют размещение УКВ вещательной или телевизионной станции, то теоретический расчет может дать только ориентировочное суждение о распределении напряженности поля на окружающей местности. Точное суждение можно получить, только измерив напряженность поля на местности.

Так, для того чтобы оценить, в каком радиусе возможен устойчивый прием передач Московского телецентра, летом 1954 г. измерялась напряженность поля МТЦ вплоть до расстояний в 150 *км*. Результаты измерений представлены на рис. 38. Линиями обозначены границы зон, где сигнал превышал 1 000, 300, 100 и 30 *мкв/м*. По разным направлениям сигнал падает до 30 *мкв/м* неодинаково быстро. Сравнительно большое уменьшение уровня сигнала в направлении городов Дмитрова и Клина объясняется экранирующим действием Клинско-Дмитровской гряды. Интересно, что на большем расстоянии, в районе Талдома, уровень сигнала снова возрастает до 100 *мкв/м*.

Для выбора места расположения передатчика и оценки напряженности поля предварительно проводят измерения при помощи опытного передатчика, работающего на той же волне, что и действительный, но имеющего значительно

меньшую мощность. Такие опыты проводились, например, в Англии. В этих опытах, кроме конкретных результатов — определения распределения напряженности поля заданной длины волны в данной местности, — получены интересные общие закономерности. Поэтому опишем эти опыты более подробно.

Измерения проводились на волнах около 2 и 0,5 *м* (частоты 102,6 и 593,6 *Мгц*). Мощность передатчика была около 100 *вт*. Измерения были выполнены по девяти радиальным направлениям вокруг передатчика на расстоянии до 70 *км* через каждые 8 *км*. Результаты измерений сильно зависели от выбора места расположения приемной антенны. Если антенна находилась на открытом месте, то отклонения при отдельных измерениях составляли 2—3 *дб*. Среди высоких деревьев случайные отклонения величин напряженности поля от среднего значения доходили до 20 *дб*. При этом на более короткой волне они были значительнее.

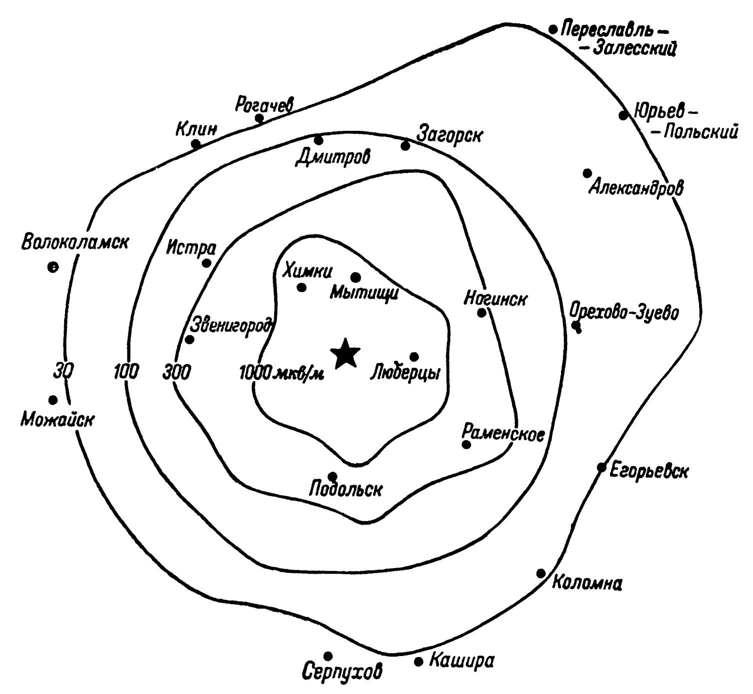


Рис. 38. Карта напряженности поля Московского телецентра.

Напряженность поля сильно зависит от профиля местности. На рис. 39 изображен профиль местности по одному из направлений, на которых велись измерения, и на графике нанесены точки измеренной напряженности поля. В начале трассы, где местность ровная, напряженность поля убывает плавно. Затем местность повышается до холма. На этом участке пути напряженность поля увеличивается с удалением от передатчика. За холмом напряженность

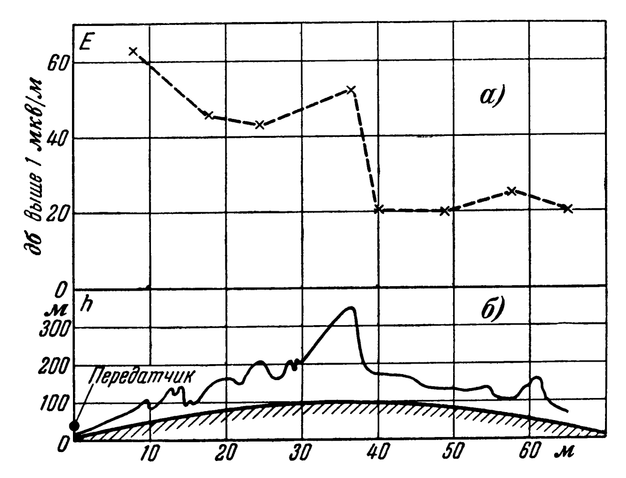


Рис. 39. Результаты измерения напряженности поля на волне с частотой 593,6 *Мгц* на неровной местности.

а — напряженность поля; *б* — профиль трассы.

поля резко убывает. Это — область тени. Дальше местность ровная. Интересно, что на этом участке пути напряженность поля не уменьшается с увеличением расстояния, а на протяжении почти 20 *км* остается постоянной. Это явление объясняется тем, что вершина холма служит как бы естественным ретранслятором. На поверхность земли за холмом приходят две волны: одна — прямая с вершины холма и вторая — отраженная от земли между холмом и приемником. При благоприятном соотношении фаз прямой и отраженной волн напряженность поля увеличивается, что в данном случае привело к компенсации уменьшения напряженности поля с расстоянием.

При измерениях было обнаружено, что на радиальных направлениях, проходящих через сильно застроенные рай-

оны города (Лондона), напряженность поля в общем ниже, чем по другим направлениям на тех же расстояниях. Особенно сильно это сказывалось на волне 0,5 *м*. Разница доходила до 15—20 *дб*.

Когда поверхность земли неровная или антенна размещается над сильно застроенным районом, возникает вопрос: от какого уровня отсчитывать высоту антенны при расчете напряженности поля?

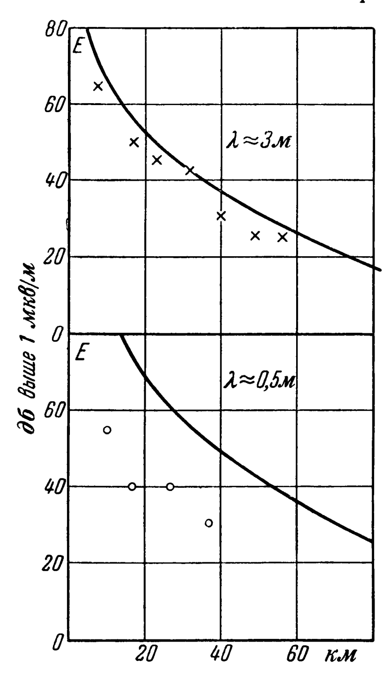


Рис. 40. Сопоставление расчетных значений напряженности поля (кривые) с данными измерений (крестики и кружочки), проводившихся на неровной местности.

Как видно из формулы (15), расчетное значение напряженности поля сильно зависит от того, какое значение высоты антенны будет выбрано. Некоторые исследователи полагают, что в случае пересеченной местности за высоту антенны следует принимать ее возвышение над средним уровнем, подсчитанным на расстоянии 3—10 *км* от антенны. Другие считают, что более правильно принимать действительную высоту антенны.

На рис. 40 приведено сопоставление расчетной кривой с данными, полученными из опыта. На волне 3 *м* измеренные значения отличаются от расчетных не более чем на 6 *дб*. На волне 0,5 *м* разница значительно больше: она достигает 20—30 *дб*. На этих графиках нанесены средние по всем направлениям значения, что исключает влияние специфики данной трассы. Измерения показали, что чем выше частота, тем больше расхождение результатов эксперимента с расчетом и тем ниже измеренная напряженность поля по сравнению с рассчитанной. Такие же результаты были получены и другими исследователями.

Путем обобщения результатов многих наблюдений была получена эмпирическая формула, дающая возможность рассчитать поправку на неровность почвы. С повышением

частоты разность между теоретическим и экспериментальным значениями напряженности поля, выраженная в децибелах, увеличивается пропорционально частоте. Это увеличение при расстояниях в пределах прямой видимости, грубо говоря, не зависит от расстояния до передатчика и высоты подъема антенны. Путем экстраполяции экспериментальных значений получена формула для определения среднего значения напряженности поля при пересеченной местности для диапазона частот 50—100 *Мгц*:

$$20 \lg E/E_0 = 37 - 20 \lg f, \qquad (23)$$

где E_0 — напряженность поля, рассчитанная для ровной поверхности земли;
f — частота, *Мгц*.

При ровной поверхности земли напряженность поля увеличивается с укорочением длины волны. Это следует из формулы (15). В реальных условиях наличие неровностей приводит к компенсации этого увеличения и напряженность поля почти не зависит от частоты.

В сильно гористой местности расчет, даже с учетом поправок, дает очень грубое приближение к действительности. Часто бывает трудно оценить места, где прием будет слабым и неуверенным. Для выяснения таких мест и выбора наилучшего места расположения передающей антенны применяется следующий способ.

Изготовляют рельефный макет местности со всеми возвышенностями и неровностями. В предполагаемое место расположения антенны помещают небольшую лампочку. Интенсивность света на рельефной карте характеризует напряженность поля УКВ передатчика на местности. Если сфотографировать этот макет и карту местности в одном и том же масштабе, а затем наложить диапозитивы и сделать общий отпечаток, то получится карта распределения напряженности поля. Перемещая лампочку (передатчик), можно выбрать наивыгоднейшее место расположения передатчика. Такой способ был применен для выбора места расположения вещательной УКВ станции в Граце (Австрия).

Нередко бывает необходимо наладить связь или желательно вести прием телевизионных передач в холмистой местности, причем приемный пункт оказывается расположенным за холмом в области тени. Тогда напряженность поля может оказаться недостаточной для приема. Для того что-

бы прием был возможен, обычно применяется один из следующих способов.

На склоне холма, обращенном в сторону передатчика, близко к вершине устанавливают приемную антенну (рис. 41,*а*). Сигнал от приемной антенны подается на предварительный усилитель, а после него — по кабелю — на мощный усилитель и передающую антенну, обращенную в сторону приемного пункта. Техническая трудность заключается в устранении обратной связи между передающей и приемной антеннами, если мощный передатчик работает на волне, на которую настроен приемник. Для устранения об-

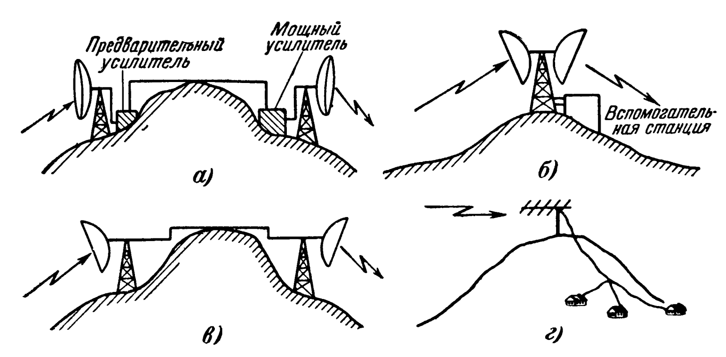


Рис. 41. Способы приема УКВ в области тени.

ратной связи передающую антенну относят на несколько десятков метров от приемной и располагают их на разных склонах холма. В этом случае требуются источник питания и постоянное обслуживание установки. Но все-таки этот способ достаточно прост и дешев. Такая система может ретранслировать только одну программу.

Можно использовать вспомогательный передатчик, который работал бы на волне, отличной от волны основной станции (рис. 41,*б*). В этом случае устраняется опасность возникновения обратной связи. Приемную и передающую антенны не нужно разносить на большие расстояния. Сигнал с приемной антенны усиливается и детектируется в приемнике, а затем модулирует вспомогательный передатчик. Оборудование требуется более сложное, необходимы источники питания и обслуживание. Такая система тоже может ретранслировать одновременно только одну программу. Для приема другой программы необходимо перестроить приемник.

Наиболее простым способом является применение пассивного ретранслятора (рис. 41,*в*). Антенну с большим коэффициентом усиления располагают на вершине холма в пределах прямой видимости передатчика. Сигнал от приемной антенны подается непосредственно на передающую антенну, расположенную в пределах прямой видимости приемного пункта. Этот способ можно применять только при наличии достаточно сильного сигнала и только в том случае, когда расстояние от передатчика до ретранслятора значительно больше, чем от ретранслятора до приемника. Пассивный ретранслятор имеет ряд преимуществ. Для него не нужны источники питания, он прост и дешев и не требует постоянного обслуживания. Большим его преимуществом является то, что он может ретранслировать одновременно несколько программ.

Для приема телевизионных передач в поселке, расположенном за холмом на небольшом расстоянии от вершины холма, целесообразно применить коллективную антенну (рис. 41,*г*). Сигнал от антенны можно подать на предварительный усилитель и затем по общему фидеру — в поселок. Для развязки между отдельными приемниками ставятся катодные повторители.

При проектировании УКВ станций необходимо знать, какова будет напряженность поля в городских условиях. Большой город представляет собой сильно пересеченную местность. В точку приема может приходить несколько волн, отраженных от различных зданий и сооружений. Даже в том случае, когда между передающей и приемной антеннами имеется прямая видимость, поле в точке приема носит очень сложный характер. Характер электромагнитного поля в городе может меняться не только от точки к точке, но и во времени из-за отражения радиоволн от движущегося транспорта (трамваев, автомобилей). При движении транспорта меняется расположение «неровностей» и напряженность поля изменяется. Часто наблюдается, что когда приемная антенна расположена невысоко (1-й и 2-й этажи), принимается не прямой сигнал, а отраженный от большого здания, расположенного поблизости.

Еще сложнее структура поля в помещениях. Комнатную антенну для получения наилучшего приема далеко не всегда приходится размещать в направлении на телецентр. В помещении перемещение антенны на несколько метров часто приводит к существенному изменению условий приема. Понятно, что при такой сложной картине поля и таком

большом числе влияющих на него факторов нельзя дать точную формулу для расчетов напряженности поля. Оценить хотя бы приблизительно среднее значение напряженности поля можно по эмпирическим формулам, полученным на основании обобщения большого количества опытных данных. Опыт показывает, что в среднем в условиях большого города для оценок может быть использована формула (15), но полученные по ней значения нужно помножить на некоторый коэффициент, меньший 1. Величина этого коэффициента колеблется в пределах 0,25—0,4. При этом высоту антенн следует отсчитывать от поверхности земли. Даже в этом случае будет получено только грубое приближение значения напряженности поля.

РАССТОЯНИЯ, ПРЕВЫШАЮЩИЕ ПРЕДЕЛ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Дифракция на УКВ и коротких волнах практически возможна только при очень больших мощностях передатчика.

Дифракция играет существенную роль в том случае, когда препятствие меньше или соизмеримо с длиной волны. Кривизна земного шара представляет собой препятствие для распространения радиоволн, притом препятствие весьма больших размеров (рис. 42). Поэтому УКВ плохо дифрагируют вокруг выпуклой поверхности земли. Но все-таки за счет дифракции УКВ могут распространяться за пределы прямой видимости в область тени. Строгое решение вопроса об определении напряженности поля дифракции весьма сложно. Такое решение было получено советским ученым В. А. Фоком. Однако полученные при этом формулы сложны для инженерных расчетов.

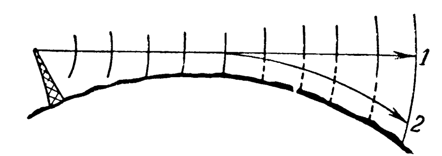


Рис. 42. Дифракция радиоволн вокруг сферической поверхности Земли.

1 — прямая волна; *2* — дифрагирующая волна.

Хорошее совпадение с опытом дает расчет по более простой дифракционной формуле, предложенной Б. А. Введенским. Напряженность поля в точке приема в зоне дифракции, как и в пределах прямой видимости, увеличивается с поднятием передающей и приемной антенн. При укорочении длины волны напряженность поля очень резко уменьшается.

На рис. 43 показан расчетный график зависимости напряженности поля от расстояния для четырех волн длиной от 7 *м* до 7 *мм*. Принято, что передающая и приемная антенны помещены на высоте 100 *м*. Тогда предел прямой видимости составляет 71 *км*. Напряженность поля отложена в относительных единицах в логарифмическом масштабе. В таком масштабе зависимость напряженности поля от расстояния имеет вид прямой. Наклон прямых тем круче, чем короче волна, т. е. с укорочением волны резче убывает напряженность поля за горизонтом.

Следует отметить, что в зоне дифракции, где напряженность поля меньше, чем в зоне прямой видимости, влия-

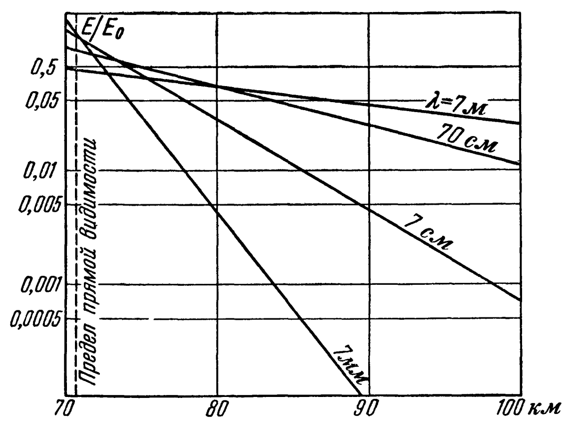


Рис. 43. Дифракционное поле за пределами видимого горизонта.

ние атмосферной рефракции сказывается сильнее. Изменения напряженности поля под влиянием атмосферной рефракции невелики по сравнению с напряженностью поля в пределах прямой видимости и значительны по сравнению со слабым дифракционным полем.

Для того чтобы при вычислении напряженности поля за пределами прямой видимости учесть влияние рефракции, в дифракционные формулы вместо действительной величины радиуса земного шара подставляют значение эквивалентного радиуса Земли, который зависит от состояния атмосферы.

Это положение проверялось опытным путем. В 1954 г. в Западной Германии проводились специальные наблюдения по распространению УКВ в области тени. Наблюдения

велись на трассе длиной 76 *км*. Для опытов использовались амплитудно-модулированный передатчик мощностью 180 *вт,* работавший на частоте 68 *Мгц*, и приемник чувствительностью 10 *мкв*. Передающая антенна помещалась на высоте 90 *м,* а приемная — на высоте 30 *м*.

Одновременно с измерением напряженности поля примерно в середине трассы запускали метеорологические радиозонды (приборы, поднимающиеся на небольших воздушных шарах и автоматически специальным кодом сообщающие по радио сведения о состоянии атмосферы: давлении, влажности и температуре). По сведениям, получаемым от радиозондов, подсчитывали коэффициент преломления атмосферы и эквивалентный радиус Земли. Полученную по расчету величину напряженности поля сравнивали с измеренным значением и, таким образом, проверяли применимость для расчетов дифракционной формулы.

Такие измерения проводились в течение 4 лет. При этом первые 2 года наблюдений не дали определенных результатов: получались то хорошие совпадения, то очень плохие. Причина этого заключалась в том, что трасса первоначально была выбрана так, что она проходила в 90 *км* от метеорологической станции, где велись наблюдения за состоянием атмосферы. В следующие 2 года изменили трассу и проложили ее так, что метеорологическая станция находилась в средней части пути. Тогда стали получаться хорошие совпадения расчетов с измерениями.

Характер изменения напряженности поля в зависимости от расстояния и от времени года и суток исследовался вблизи Харькова. Измерялась напряженность поля на частоте 83,75 *Мгц* звукового сопровождения Харьковского телецентра на нескольких направлениях на расстояниях 90—120 *км* от него. Анализ результатов этих измерений показал, что в месте приема присутствует и более устойчивая составляющая напряженности поля, обусловленная дифракцией и нормальной рефракцией и составляющая поля, быстро меняющаяся во времени — рассеянным сигналом. Уровень напряженности поля в этих опытах менялся мало в течение года.

Все опыты показали, что за пределами видимого горизонта в зоне дифракции напряженность поля сильно зависит от состояния атмосферы.

В последние годы были опубликованы данные о приеме метровых волн на трассе, экранированной высокой горной вершиной, причем протяженность трассы превышала пре-

дел прямой видимости. Оказалось, что напряженность поля за горой в некоторых случаях не убывает, а возрастает с увеличением расстояния. Вершина горы действует подобно приемно-передающей антенне. Поле в точке приема выражается суммой четырех волн, распространяющихся по путям *АБВ, АГБВ, АБДВ* и *АГБДВ* (рис. 44), амплитуды и фазы которых зависят от геометрии трассы и коэффициента отражения от поверхности земли.

Явление увеличения напряженности поля отчетливо наблюдалось при проведении опытов по сооружению ретрансляционной линии в штате Колорадо (США). Измерения проводились на нескольких трассах, каждая из которых имела протяженность около 150 *км*. Одна из трасс, проходившая в Скалистых горах, пересекала вершину Пайка, имеющую высоту около 4 000 *м*. Оказалось, что на этой трассе напряженность поля в точке приема значительно (на 60 *дб*) превосходила напряженности поля на других трассах. Кроме того, прием был значительно устойчивее, почти не наблюдалось замираний, вызываемых обычно изменениями метеорологических условий, так как распространение происходило в более высоких, стабильных слоях атмосферы.

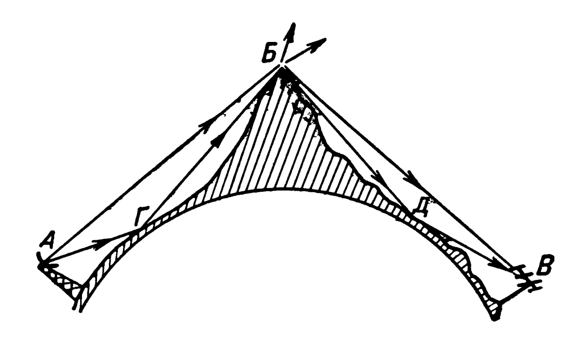


Рис. 44. Явление „усиления“ препятствием.

Повышенная напряженность поля за горным хребтом иногда используется для регулярного приема телевизионных передач. Так, прием передач телевизионного центра г. Фрунзе оказывается возможным в пунктах, расположенных на значительном расстоянии и в горных районах.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ДАЛЬНЕЕ ТРОПОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

РЕФРАКЦИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ «АТМОСФЕРНОГО ВОЛНОВОДА»

С увеличением мощности передающих устройств и повышением чувствительности приемников стал возможным прием УКВ за пределами прямой видимости. Теоретически было показано, что появление на таких расстояниях поля небольшой напряженности может быть объяснено дифракцией УКВ. Однако наблюдавшиеся напряженности поля превосходили уровни, рассчитанные по законам дифракции. Оказалось, что такое увеличение напряженности поля происходит благодаря процессам, происходящим в тропосфере.

Основными факторами, способствующими дальнему распространению УКВ в тропосфере, являются повышенная рефракция радиоволн, отражение от слоистых неоднородностей тропосферы и рассеяние турбулентными неоднородностями тропосферы. Большей частью эти факторы действуют одновременно, и трудно разделить их влияние.

Иногда в тропосфере создаются такие условия, что коэффициент преломления изменяется с высотой необычно. Например, после захода солнца поверхность Земли быстро охлаждается; охлаждаются и нижние слои воздуха, верхние же слои воздуха еще остаются нагретыми. Значит, температура воздуха в этом случае не убывает, а возрастает с высотой и коэффициент преломления убывает с увеличением высоты более резко, чем при нормальной рефракции.

Резкое убывание коэффициента преломления атмосферы с высотой наблюдается часто над водной поверхностью: вблизи воды влажность воздуха велика и резко убывает с изменением высоты. Возможно и обратное явление: ветер принес холодный воздух с моря, вблизи же Земли воздух остался теплым. Тогда температура убывает с высотой быстрее, чем обычно, а коэффициент преломления убывает с высотой медленнее, чем обычно, или может даже возрастать.

При отклонении закона изменения коэффициента преломления атмосферы от стандартного изменяется и кривизна траектории распространения волны. На рис. 45 схематически показано, как при различных видах изменений коэф-

фициента преломления с высотой меняется кривизна траектории волны.

Рис. 45,*а* соответствует случаю нормальной атмосферной рефракции. Коэффициент преломления меняется при этом на $4 \cdot 10^{-6}$ при подъеме на каждые 100 *м*. Траектория волны представляет собой дугу окружности радиусом 25 000 *км*, обращенную выпуклостью вверх.

Рис. 45,*б* соответствует случаю так называемой отрицательной атмосферной рефракции, когда коэффициент преломления возрастает с высотой. Траектория волны об-

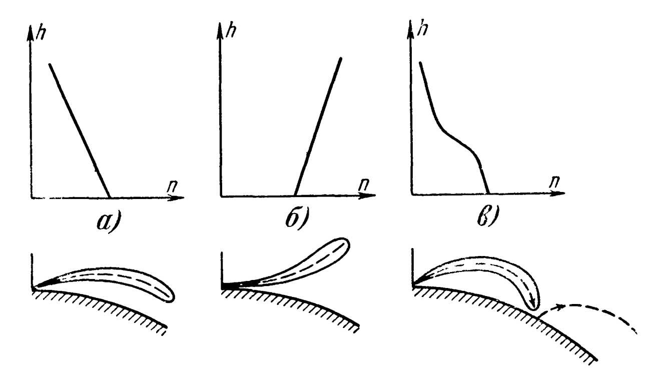


Рис. 45. Различные случаи атмосферной рефракции.
а — нормальная, *б* — отрицательная; *в* — положительная (атмосферный волновод).

ращена выпуклостью вниз, и волна удаляется от земной поверхности быстрее, чем в случае нормальной рефракции. Это приводит к уменьшению напряженности поля на данном расстоянии и уменьшению дальности распространения УКВ. Если при нормальной рефракции возможен прием где-то на границе прямой видимости, то при появлении отрицательной рефракции прием оказывается невозможным, связь нарушается.

Рис. 45,*в* соответствует случаю положительной атмосферной рефракции, когда коэффициент преломления убывает с высотой быстрее, чем при нормальной рефракции. Траектория волны обращена при этом выпуклостью вверх и имеет меньший радиус кривизны. Если показатель преломления изменяется с высотой больше чем на $16 \cdot 10^{-6}$ на каждые 100 *м*, то траектория волны становится настолько изогнутой, что волна получает возможность вернуться на

поверхность земли. Благодаря этому увеличивается дальность распространения радиоволн.

Положительная рефракция радиоволн наблюдается обычно в антициклонную погоду при вечернем охлаждении почвы и наиболее часто в теплое время года.

Рефракционные свойства атмосферы меняются сравнительно медленно, поэтому поле, обусловленное повышенной рефракцией, оказывается достаточно устойчивым, без быстрых замираний. Явление положительной рефракции объясняет возможность хорошего приема телевизионных передач на расстояниях порядка 200 *км*.

Когда область положительной рефракции простирается на значительные расстояния над поверхностью Земли, то в этом районе УКВ могут быть приняты на весьма больших расстояниях от передатчика. Распространение УКВ в этом случае происходит следующим образом: вернувшаяся на Землю волна отражается от ее поверхности, затем рефрагирует в атмосфере и снова возвращается на Землю, т. е. радиоволна распространяется путем последовательного отражения от атмосферы и поверхности Земли. Это явление напоминает распространение радиоволн в металлическом волноводе и поэтому получило название «атмосферного волновода». В отличие от металлического волновода стенки атмосферного волновода полупрозрачны. Только часть энергии волны отражается от атмосферы, а часть, преломляясь, проходит через нее и не возвращается на Землю.

При одних и тех же условиях рефракции более короткие волны лучше отражаются и меньше просачиваются сквозь «стенки» атмосферного волновода. Для атмосферного волновода определенной высоты по аналогии с металлическим имеется некоторая критическая длина волны $\lambda_{кр}$. Волны длиннее критической быстро затухают и не распространяются в волноводе:

$$\lambda_{кр} = 0{,}085 h_{в}^{3/2}, \qquad (24)$$

где $\lambda_{кр}$ — в *см*;
$h_{в}$ — в *м*.

Поэтому распространение радиоволн в условиях атмосферного волновода наблюдается чаще всего на дециметровых и сантиметровых волнах и реже на метровых.

Размеры атмосферного волновода должны во много раз превосходить длину волны. Так, для сантиметровых волн необходим волновод высотой 30—35 *м*.

Рис. 46 иллюстрирует распространение УКВ в условиях атмосферного волновода. Рис. 46,*а* соответствует случаю так называемого «приземного волновода», когда непосредственно у поверхности земли создались такие атмосферные условия, что рефракция положительна и только на некоторой высоте она становится нормальной. Уровень, до которого продолжается положительная рефракция, является высотой волновода.

Рис. 46,*б* соответствует случаю приподнятого волновода, когда рефракция у поверхности земли до некоторой высоты нормальна, затем на некотором участке положительна (это и есть волновод) и затем снова нормальна. Роль верхней и нижней стенок волновода играет атмосфера. Волна

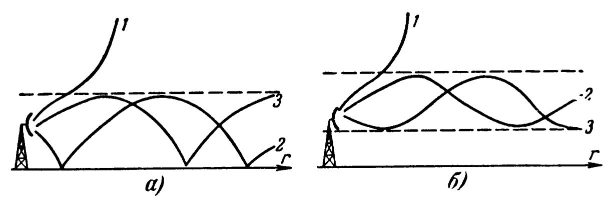


Рис. 46. Распространение УКВ в условиях атмосферного волновода.
а — приземный волновод; *б* — поднятый волновод

распространяется в волноводе, отражаясь от верхней и нижней воздушных стенок волновода.

В условиях волноводного канала отражения волн от его стенок получаются только при пологих траекториях их распространения (*2* и *3* на рис. 46), а при более крутых (*1*) волны просачиваются сквозь стенки. Если передатчик и приемник находятся в пределах волновода, то прием возможен на больших расстояниях. В противном случае дальность приема может даже уменьшиться.

Теоретически возможность распространения УКВ в условиях волноводного канала была установлена советским ученым П. Е. Краснушкиным в 1943 г. Дальнейшее развитие теория атмосферного волновода получила в работах В. А. Фока.

Влияние волноводного канала на распространение УКВ неоднократно подвергалось тщательному исследованию. Так, например, в Германии в течение 2 лет непрерывно проводились наблюдения за напряженностью поля УКВ на трассах протяженностью 200—300 *км*. Одновременно тщательно исследовались метеорологические условия. При

помощи воздушных шаров велись измерения влажности, давления и температуры воздуха на высотах до 200 *м,* которые давали возможность обнаружить присутствие волноводного канала. Случаи появления волноводного канала сопровождались значительным увеличением напряженности поля. Метеорологические измерения проводились на приемном конце трассы.

Иногда появление волноводного канала, отмечаемое метеорологическими измерениями, не совпадает по времени с увеличением напряженности поля. Выяснилось, что это зависит от направления ветра: если ветер дует от передающего пункта к приемному, то сначала возрастает напряженность поля, а затем отмечается появление атмосферного волновода. Если метеорологические измерения ведутся в средней части пути, то результаты метеорологических измерений точно совпадают во времени с изменением напряженности поля.

На основании метеорологических данных можно давать прогнозы распространения УКВ. С другой стороны, исследование влияния атмосферных условий на распространение УКВ может позволить по изменению условий распространения судить об изменениях в атмосфере и использовать это для прогнозирования погоды.

Во всех ли случаях появление волноводного канала улучшает условия связи? Оказывается, бывают случаи, когда при появлении атмосферного волновода связь полностью нарушается. Так, например, когда на побережье Австралии впервые установили радиолокационные установки, то обнаружилось, что часто сильно увеличивалась дальность «видимости» станций для объектов, находящихся на морской поверхности, и в то же время станции, следящие за самолетами, переставали обнаруживать их при сравнительно небольших расстояниях. Для исследования причин сокращения видимости радиолокационных установок, следящих за самолетами, были проведены специальные наблюдения. Самолет совершал полет в сторону моря на расстояние до 200 *км,* то поднимаясь до 1 000 *м* над уровнем моря, то снижаясь до бреющего полета. В это время работала береговая радиолокационная станция на частоте 200 *Мгц* и велись метеорологические наблюдения, позволившие определить изменение коэффициента преломления атмосферы с высотой.

На рис. 47 сплошной линией нанесена трасса полета самолета. На тех участках трассы, где самолет отмечался

станцией, наложены штрихи, пропорциональные интенсивности принятого сигнала. Пунктирными линиями отмечены границы волноводного канала, построенные на основании метеорологических измерений.

Из рис. 47 следует, что в области ниже и внутри атмосферного волновода самолет обнаруживался на расстояниях свыше 150 *км*. Когда же самолет поднимался выше атмосферного волновода, то станция не могла его обнаружить даже на небольшом расстоянии. Исключение составляет первый участок пути, где самолет находился в обла-



Рис. 47. Работа радиолокационной станции обнаружения самолетов в условиях атмосферного волновода.

сти проникновения волн, излученных антенной радиолокационной станции.

Таким образом, в присутствии атмосферного волновода дальность действия самолетной радиолокационной станции резко сокращается. Бороться с этим можно либо путем увеличения излучаемой мощности, либо путем понижения рабочей частоты. При удлинении волны бо́льшая часть энергии просачивается сквозь стенки волноводного канала и, следовательно, он оказывает меньшее влияние.

Интересный материал для изучения влияния атмосферных волноводов на распространение радиоволн могут дать наблюдения радиолюбителей, работающих во втором и более высокочастотных диапазонах. Так, обобщение радиолюбительских наблюдений в диапазоне 2 *м* дало ценный экспериментальный материал. Дальние любительские связи наблюдались в ясную антициклонную погоду. Возможность дальних связей длилась в течение 2—3 дней подряд, и ни разу не наблюдалось более длительного периода. При этом удавалось установить связи на расстоянии до 600—800 *км*. Бывали случаи, что при, казалось бы, благоприятной для дальнего распространения УКВ погоде связи не наблюдалось.

На волнах сантиметрового диапазона наблюдались связи на расстоянии 1 000 *км* и более. На волнах длиной 5—10 *м* волноводное распространение наблюдается редко.

Когда чаще возможен сверхдальний тропосферный прием? В ответе на этот вопрос мнения исследователей расходятся. Большинство наблюдений показало, что чаще всего такой прием наблюдается во время антициклона, главным образом летом во второй половине дня или вечером. Но некоторые наблюдатели отмечали появление атмосферных волноводов зимой или в утренние часы. По-видимому, на различных трассах в разных климатических условиях благоприятные условия для образования атмосферных волноводов могут появляться в разное время.

Понятно, что при разнообразных климатических условиях нашей обширной страны в разных районах различно и время появления условий, благоприятных для сверхдальнего распространения. Только радиолюбители могут охватить все уголки страны и помочь широкому изучению этого интересного явления.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ СЛОИСТЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТРОПОСФЕРЫ

В некоторых случаях в атмосфере появляются слои воздуха, в которых коэффициент преломления резко меняется, претерпевая как бы «скачок». Это наблюдается, например, при прохождении фронта холодного воздуха.



Рис. 48. Отражение УКВ от слоистых неоднородностей.

От резкой границы изменения коэффициента преломления воздуха могут отражаться радиоволны, падающие полого на эту границу (рис. 48). Волны, отраженные от слоистой неоднородности, могут быть приняты на расстоянии до 300 *км* от передатчика.

Однако слоистые неоднородности появляются нерегулярно, что не позволяет использовать их для дальнего эксплуатационно надежного приема телевидения или связи. Напряженность поля в этом случае подвержена сильным колебаниям с глубокими замираниями за счет того, что

в точку приема приходит несколько волн, разность фаз между которыми непрерывно меняется из-за изменений высоты и структуры слоя.

При приеме телевизионной передачи во время появления слоистых неоднородностей возможно появление на экранах телевизионных приемников многократных изображений.

РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ТРОПОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Дифракция и нормальная атмосферная рефракция могут объяснить возможность приема УКВ на расстояниях, незначительно превышающих пределы прямой видимости. Но в последнее время было обнаружено, что при применении остронаправленных антенн и передатчика достаточной мощности можно осуществить регулярную связь на УКВ на расстоянии 300—500 *км*. Такая возможность обусловлена рассеянием (переизлучением) радиоволн на неоднородностях тропосферы.

Процесс рассеяния радиоволн еще далеко не изучен, но грубо можно представить себе его следующим образом. Тропосфера неоднородна по своему строению, она представляет собой совокупность неустойчивых воздушных объемов — неоднородностей, в которых диэлектрическая проницаемость воздуха отличается на некоторую небольшую величину от среднего значения. Эти неоднородности непрерывно флуктуируют, т. е. их плотность, форма и размеры непрерывно меняются.

Радиоволна, падающая на эти неоднородности, наводит в каждой из них токи, которые в свою очередь излучают как элементарные диполи. Таким образом, неоднородности играют роль своеобразных ретрансляторов.

Основную роль в рассеянии радиоволн играют неоднородности размером 50—60 *м*, т. е. рассеяние радиоволн при дальней связи происходит на неоднородностях, размеры которых все же во много раз превышают длину волны. При рассеянии радиоволн на каплях воды размеры неоднородностей много меньше длины волны и рассеиваемые волны распространяются равномерно во все стороны.

При условиях, имеющих место в тропосфере, рассеяние происходит в пределах угла, составляющего несколько градусов с направлением падающего луча. Поэтому основная часть энергии волны проходит сквозь рассеивающую область и не может быть использована для приема. Только

небольшая часть энергии возвращается на Землю, где она может быть принята.

На рис. 49 показана схема работы линии связи при использовании тропосферного рассеяния. Передающая антенна облучает некоторый участок тропосферы, называемый «рассеивающим объемом». Приемная антенна как бы «собирает» рассеянные волны. Таким образом, на приемную антенну приходят волны не от точечного источника, каким можно считать передающую антенну, а от источника, распределенного по значительному объему пространства.

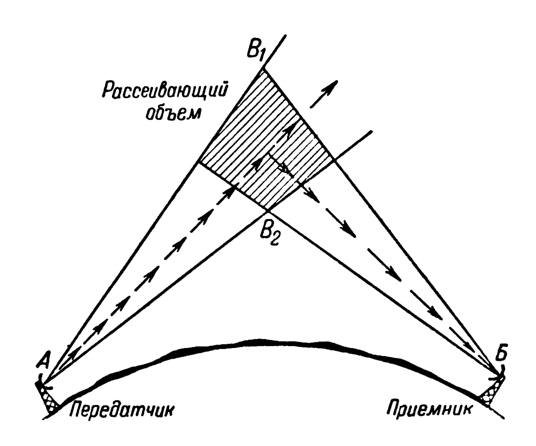


Рис. 49. Схема связи на УКВ при использовании явления рассеяния радиоволн в тропосфере.

Было предложено несколько теорий для расчета напряженности поля радиоволн, рассеянных на неоднородностях тропосферы, но еще не выяснено окончательно, какая из них является наиболее правильной. Поэтому для инженерных расчетов пользуются полуэмпирическими методами, основанными на результатах наблюдений.

Обычно определяют ослабление при распространении радиоволн по данной трассе. Ослабление L определяется как выраженное в децибелах отношение мощности передатчика к мощности, принимаемой на согласованную нагрузку:

$$L = 10 \lg \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}}. \qquad (25)$$

Для определения величины L можно пользоваться графиком на рис. 50. Здесь по оси абсцисс отложена величина r_3, определяемая как

$$r_3 = r - r_1 - r_2, \qquad (26)$$

где $r_1 = 4{,}12\sqrt{h_1}$, *км*;

$r_2 = 4{,}12\sqrt{h_2}$, *км*;

h_1 и h_2 — высоты передающей и приемной антенн, *м*.

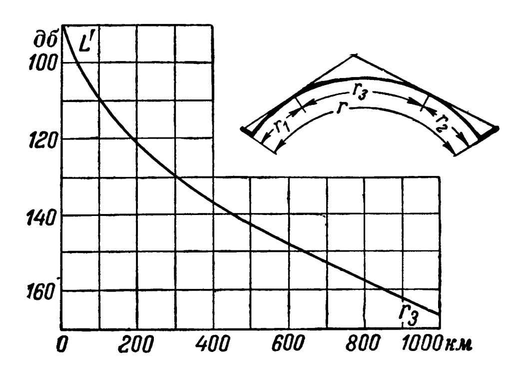


Рис. 50. График и схема для расчета линии связи, использующей рассеяние УКВ в тропосфере.

По оси ординат отложена величина L', связанная с величиной L соотношением

$$L = L' + 10\lg r + 20\lg f - D_{пер} - D_{пр}, \qquad (27)$$

где $D_{пер}$ и $D_{пр}$ — к. н. д. передающей и приемной антенн;

f — частота, *Мгц*.

Приведенный график применим для расчета линий связи, проходящих над сушей и работающих в диапазоне частот 100—1 000 *Мгц*.

Прием рассеянного сигнала возможен на различных расстояниях вплоть до предельного, зависящего от высоты рассеивающей области.

Напряженность поля рассеянного сигнала подвержена замираниям, получающимся в результате сложения колебаний, приходящих от разных участков рассеивающего объёма. Частота замираний увеличивается с увеличением ско-

рости ветра и укорочением волны. Чем больше скорость ветра, тем быстрее и существеннее изменения в структуре тропосферы, а чем короче длина волны, тем при меньших изменениях в тропосфере изменяется фаза радиоволны. Моменты замираний не совпадают в различных точках пространства. Это позволяет применять для борьбы с замиранием прием на разнесенные антенны. Антенны разносят на расстояние 25—100 длин волн и используют наибольший из двух сигналов.

Рассеяние УКВ в тропосфере вызывает некоторые ограничения в ширине полосы частот, связанные с возможностью нескольких путей прохождения радиоволн. Наиболее короткий путь проходит по нижней части рассеивающего объема, а наиболее длинный — по его верхней части. Поэтому один сигнал запаздывает по отношению к другому, что вызывает удлинение передаваемого импульса, а это эквивалентно сужению полосы частот. Ширина полосы частот Δf может быть ориентировочно определена из соотношения

$$\Delta f = \frac{c}{\Delta r}, \tag{28}$$

где c — скорость света;

Δr — разность в длинах путей, проходимых различными волнами в пределах ширины диаграммы направленности.

Из рис. 49 видно, что $\Delta r = AB_1Б - AB_2Б$. Чем шире диаграммы направленности антенн, тем больше Δr, а следовательно, тем меньшую полосу частот можно передать без искажения. Стремление передать более широкую полосу частот приводит к необходимости применения остронаправленных антенн с шириной диаграммы направленности в один или несколько градусов. Практически оказывается возможным передать полосу частот до 10—12 *Мгц*.

Многочисленные опыты показали, что напряженность поля рассеянного сигнала мало зависит от длины волны. Это и позволило использовать дециметровые и сантиметровые волны. На графике на рис. 51 нанесены результаты измерений напряженности поля для различных расстояний. Кружками обозначены измеренные значения на волне 1 *м*, а крестиками — на волне 10 *см*. В том и другом случаях уровень напряженности поля лежит в одних пределах. Однако на сантиметровых волнах уровень напряженности поля несколько ниже, чем на метровых. Опыт показал, что

на больших расстояниях частотная зависимость проявляется слабее.

Кривая на рис. 51 показывает средний уровень напряженности поля. Здесь же для сопоставления нанесены величины напряженности поля, рассчитанные по закону дифракции с учетом нормальной рефракции для волны длиной 10 *см*. В расчете, так же как и в эксперименте, высота передающей антенны принималась равной 36, а приемной — 21 *м*. На графике напряженности поля отложены в относительных единицах в логарифмическом масштабе.

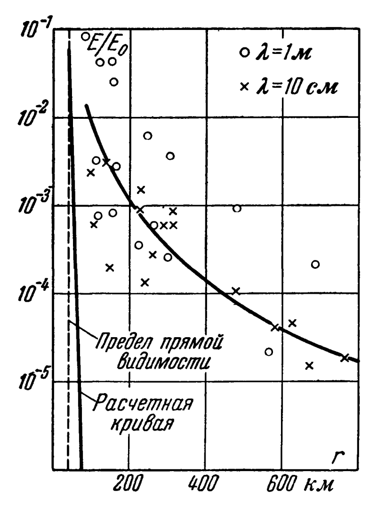


Рис. 51. Данные измерений напряженности поля УКВ, рассеянных в тропосфере.

Из рассмотрения рис. 51 следует, что с удалением за пределы прямой видимости получается большее расхождение между опытом и дифракционной теорией, так как все бо́льшую роль играет рассеяние в тропосфере.

Экспериментально установлено, что напряженность поля рассеянного сигнала убывает обратно пропорционально третьей-четвертой степени расстояния (в зависимости от направленности антенны), тогда как при распространении в пределах прямой видимости напряженность поля убывает обратно пропорционально второй степени расстояния.

Такое быстрое убывание напряженности поля и сильные замирания предъявляют высокие требования к аппаратуре. Приходится применять передатчики значительной мощности (порядка 10 *квт*) и остронаправленные антенны. Сконструировать остронаправленные антенны легче для более коротких волн. Чем короче волна, тем меньше могут быть размеры антенны для создания луча определенной ширины. Поэтому линии связи, использующие тропосферное рассеяние, работают на дециметровых и сантиметровых волнах.

На рис. 52 изображена параболическая антенна, использующаяся на одной из линий связи рассматриваемого

типа. Коэффициент усиления антенны равен 10 000. Антенна состоит из облучателя и параболического отражателя. Отражатель, диаметр которого равен 18 *м*, сконструирован из алюминиевых трубок. Такая антенна представляет собой сложное сооружение весом более 1 *т*. Она должна быть очень прочной, чтобы выдержать напор ветра.

Явление тропосферного рассеяния с успехом используется для создания ретрансляционных линий. Несмотря на то,

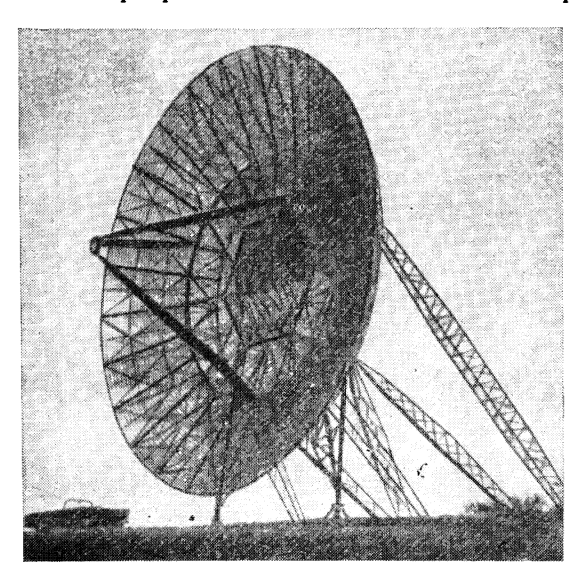


Рис. 52. Параболическая антенна дальней УКВ линии связи.

что при этом требуются мощные передатчики, сложные антенны и чувствительные приемные устройства, создание таких линий оказалось экономически выгодным. Этот способ передачи позволил размещать промежуточные станции на расстоянии не 50—70 *км*, как обычно, а 200—400 *км*, что позволяет сократить число необходимых станций, что особенно важно в малонаселенных районах и на море. Линии, использующие тропосферное рассеяние, могут быть применены для передачи частотно-модулированного вещания, телевидения и многоканальной связи.

Такая линия действует на Средиземном море. Она связывает Сицилию и Сардинию с африканским берегом, пе-

рекрывая расстояние около 300 *км*. На такое же расстояние по аналогичным линиям в США передается телевидение. Линия передачи проходит над морем и пересекает о. Лонг-Айленд. Качество принимаемого изображения по литературным данным вполне удовлетворительно.

ГЛАВА ШЕСТАЯ
ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

ОТРАЖЕНИЕ ОТ РЕГУЛЯРНОГО СЛОЯ F_2

Возможность сверхдальнего распространения метровых волн обусловливают следующие явления, происходящие в иносфере: 1) повышение электронной концентрации слоя F_2 в годы максимума солнечной деятельности; 2) появление спорадического слоя E_s и 3) рассеяние радиоволн на

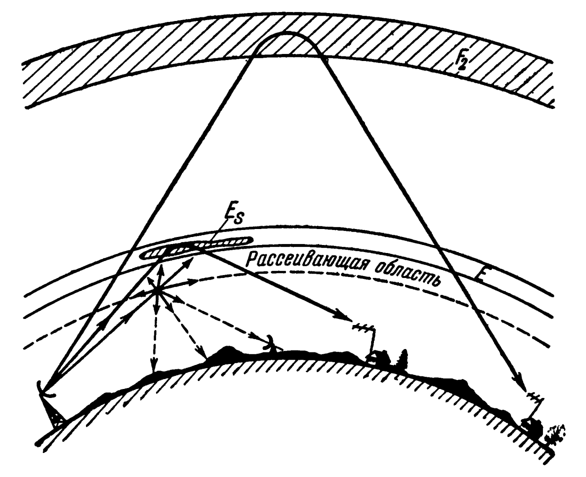


Рис 53. Схема ионосферного распространения УКВ.

неоднородностях ионосферы. Каждый из указанных видов распространения имеет свои характерные особенности.

На рис. 53 изображена схема всех трех случаев ионосферного распространения метровых волн.

Путем отражения от ионосферы на высоте слоя F_2 распространяются короткие волны. Для волн короче 10 *м* слой F_2 является большей частью прозрачным. Однако в годы

максимума солнечной деятельности электронная плотность слоя F_2 достигает в дневное время зимой таких высоких значений, что часто оказывается возможной радиосвязь на волнах длиной 10—6 *м*.

Зона молчания составляет при этом не менее 2 000 *км*. Предельное расстояние, которое может быть перекрыто путем одного отражения от ионосферы, достигает 3 500 — 4 000 *км*. Кроме того, возможно распространение двумя «скачками», т. е. путем двух последовательных отражений: от слоя F_2 и от поверхности земли, что удваивает возможные расстояния дальности передачи. Таким образом, при отражении от слоя F_2 метровые волны могут распространяться на расстояние от передатчика примерно 2 000—10 000 *км*.

Максимумы солнечной деятельности наблюдались в 1937—1938, 1947—1948 и 1957—1959 гг.

Зимой 1937 и 1938 гг. радиолюбители Ленинграда, работавшие в 10-метровом диапазоне волн, поддерживали радиосвязь с радиолюбителями Западной Сибири, Англии, Франции, Египта, Австралии, США и ряда других стран. Радиосвязь в этом диапазоне оказывалась возможной с октября по апрель в дневные часы с 10—11 до 18—19 *ч*. При этом утром связь налаживалась с восточными корреспондентами, а вечером она была возможна с западными.

В зимние месяцы 1947—1949 гг. наблюдалось много случаев связи радиолюбителей Англии и США, работавших на волнах длиной около 6 *м*. Американские станции, работавшие на волне 7 *м*, были ежедневно слышны в Англии, а телевизионные передачи из Англии принимались на юге Африки.

Начиная с зимы 1956 г., максимальные применимые частоты коротковолнового диапазона начали возрастать — приближался новый максимум солнечной деятельности. Этот максимум оказался очень интенсивным и принес много интересного радиолюбителям, работающим в диапазоне метровых волн. В зимние дни 1957—1959 гг. на волнах длиной 7—8 *м* удавалось устанавливать большое количество неожиданных дальних связей.

На рис. 54 показано, как изменились максимальные частоты, которые могли отражаться от слоя F_2 в течение суток в декабре 1956 г. На кривых указаны расстояния, на которые можно вести передачу. Эти кривые построены для линий радиосвязи, у которых средняя часть пути лежит на широтах 45—35° с. ш. Из кривых видно, что прием радио-

волн частотой выше 30 *Мгц* на этих направлениях мог осуществляться с 8 до 16 *ч*, причем протяженность линии связи могла превышать 2 000 *км*.

На линиях связи, проходящих севернее, время возможной связи на УКВ сокращается и связь становится возможной не каждый день. Это отмечалось, например, московским радиолюбителем С. К. Сотниковым, который в некоторые дни декабря 1956 г. в 14—15 *ч* по московскому

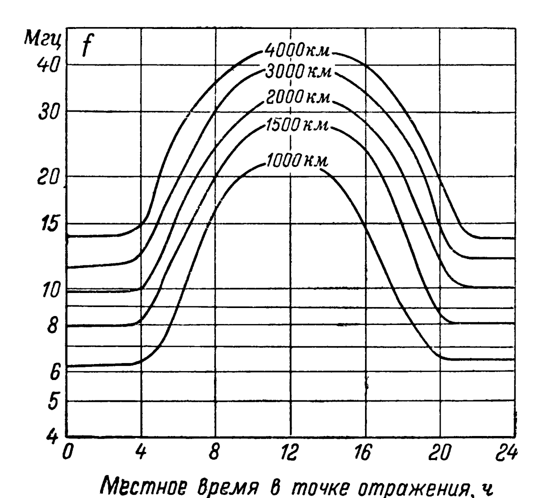


Рис. 54. Максимальные частоты, на которых можно было вести связь в декабре 1956 г. на трассах протяженностью 1 000 — 4 000 *км*.

времени принимал передачи телевидения из Лондона на волне с частотой 45 *Мгц* и еще чаще звуковое сопровождение телевизионных передач из Лондона и Парижа на волне с частотой около 41 *Мгц*. В этом же месяце, но в предполуденные часы в Москве был возможен прием сигналов радиолюбителей, работающих в диапазоне 38—40 *Мгц*, из Томска, Новосибирска, Барнаула, Ташкента, Самарканда.

Дальний прием метровых радиоволн ведут и радиолюбители севера. Так, радиолюбители Мурманска зимой 1958 г. устанавливали радиосвязи с радиолюбителями Якутска, Кызыла, Иркутска, Сталинабада и даже Владивостока. Такие сверхдальние связи осуществлялись благодаря отражению радиоволн от слоя F_2. В ближайшие годы

число солнечных пятен на Солнце начнет уменьшаться и электронная плотность слоя F_2 не будет такой большой. Уменьшится и возможность дальних связей до появления нового максимума солнечной деятельности.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E_s

Появляющийся в ионосфере спорадический слой E_s имеет временами электронную плотность, достаточную для отражения волн метрового диапазона. С увеличением числа и мощности телевизионных станций прием телепередачи на больших расстояниях при отражении радиоволн от слоя E_s стал нередким явлением.

Спорадический слой появляется нерегулярно, поэтому и этот вид сверхдальнего приема не может быть регулярным. Частота случаев сверхдальнего распространения зависит от частоты появления слоя E_s. Поэтому сверхдальний прием наблюдается чаще всего летом в дневное время и — очень редко — зимой. От года к году частота случаев приема меняется, но нерегулярно. Прямой связи между 11-летним циклом солнечной активности и таким видом распространения установить не удалось. Чаще всего такой прием наблюдается в более южных широтах.

Высота, на которой образуется слой E_s (100—120 *км*), определяет максимальное расстояние передачи в 2 000—2 500 *км*. Плотность ионизации слоя определяет максимальные рабочие частоты и протяженность зоны молчания. Зона молчания для метровых волн составляет не менее 1 000 *км*. Чем короче волна, тем больше протяженность зоны молчания. Следовательно, прием метровых волн возможен на расстоянии примерно 1 000—2 500 *км*.

На широтах Москвы — Киева возможен сверхдальний прием на частотах до 70—75 *Мгц*, а на широтах Алма-Аты — Ашхабада — на частотах до 90—95 *Мгц*. Чем короче волна, тем реже возможен прием. Прием возможен в то время, когда спорадический слой находится в средней части пути между передатчиком и приемником. Спорадический слой появляется над небольшой территорией, поэтому обычно одновременно возможен прием только одной станции. Благодаря движению слоя через некоторое время оказывается возможным прием другой станции или первой станции в новом пункте. Продолжительность приема бывает различной: от нескольких минут до нескольких часов.

В настоящее время не удается указать точно время появления слоя E_s и предсказать время появления приема и его продолжительность. Характерной особенностью при отражении от спорадического слоя E_s является его полупрозрачность. Не вся энергия волны, падающей на слой, отражается от него; часть энергии проходит сквозь слой и теряется для приема, и только небольшая часть (иногда 0,1) отражается. При этом чем выше частота, тем меньшая часть энергии отражается. Поэтому наиболее часто возможен прием передач мощных станций (мощностью не менее 3—5 *квт*).

В летние месяцы, начиная с 1954 г., в Московской обл. наблюдается прием телевизионных передач из Праги (расстояние — около 1 800 *км*). Напряженность поля пражской станции оказывается временами настолько значительной, что передачи московской станции совершенно вытесняются. Временами удаленная станция создает только сильные помехи, проявляющиеся в виде «муара» на экране и треска в громкоговорителе. В пределах Москвы, как и в непосредственной близости от других мощных телецентров, где напряженность поля, создаваемая местным передатчиком, велика, сверхдальнего приема почти не наблюдается. Прием передач из Москвы наблюдается в различных странах Западной Европы. На Украине возможен прием из Италии, Дании, Швейцарии. В Прибалтике смотрят передачи из Парижа и Лондона. На рис. 55 показана фотография телевизионных изображений, принятых на Украине.

У нас и за границей многие радиолюбители специально совершенствуют свою аппаратуру для сверхдальнего приема телевидения. Для этого повышают чувствительность приемника и применяют направленные антенны. Хорошие результаты получаются при использовании двухъярусной пятиэлементной антенны, имеющей коэффициент усиления 10—12 (рис. 56). В том случае, когда предусмотрена возможность поворота антенны, удается следить за движением спорадического слоя и по мере его перемещения принимать предачи нескольких станций. Например, если спорадический слой появился где-то в районе Карпат над Румынией, то на Украине возможен прием передач из Рима. Если слой E_s начнет перемещаться к северу, то тот же наблюдатель может увидеть последовательно передачи из Вены и Праги. Если слой E_s продвинется на северо-запад, наблюдатель увидит передачи из Швейцарии и Западной Германии. На карте на рис. 57 показано

Рис. 55. Фотографии телевизионных изображений, принятых на Украине из различных стран.
а — Швейцария; *б* — Италия.

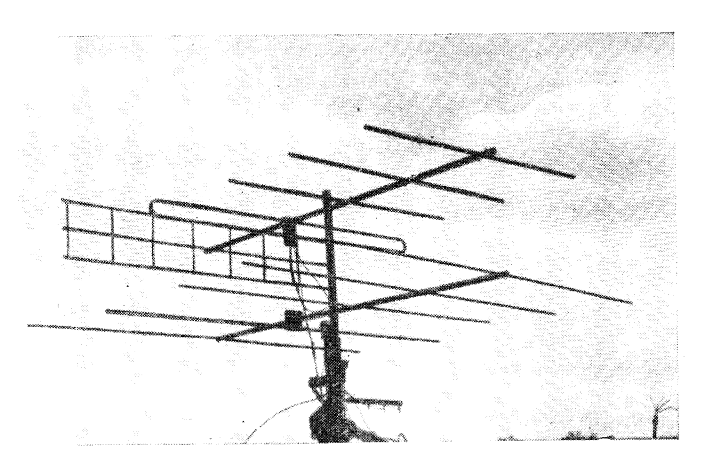


Рис. 56. Антенна для дальнего приема телевидения.

перемещение слоя E_s, при котором оказался возможным прием различных станций на Украине.

Отражение радиоволн от слоя E_s создает возможность для установления сверхдальних связей на УКВ. В этом случае применяются направленные приемные и передающие антенны, что позволяет наладить связь при мощности передатчика в несколько десятков ватт.

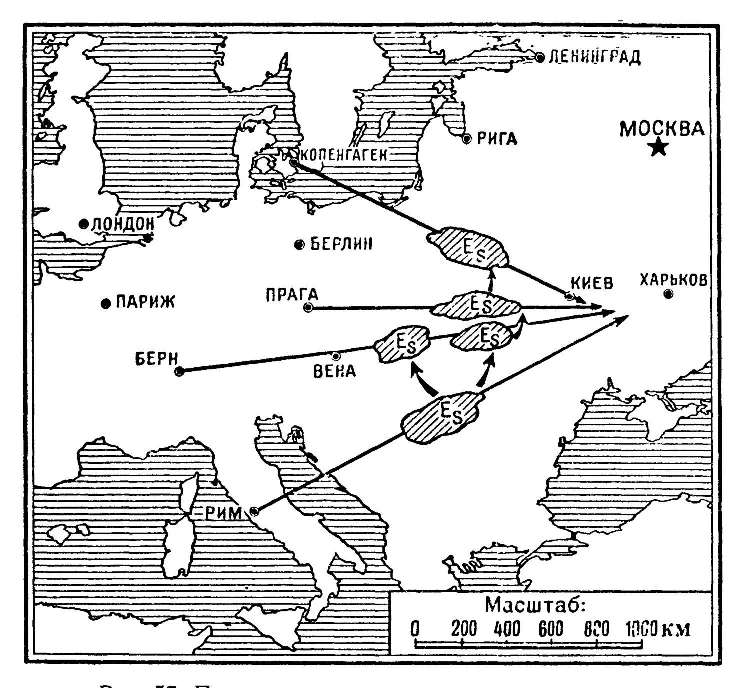


Рис. 57. Перемещение спорадического слоя E_s.

Радиолюбителям из Горького, работающим в 7-метровом диапазоне, удавалось летом 1956 г. установить связь с радиолюбителями Ростова-на-Дону, Свердловска, Барнаула. Радиолюбители Ростова-на-Дону в это же время устанавливали связь с Уфой, Пермью, Кировом. Радиосвязь в этом диапазоне на такие расстояния возможна только благодаря отражению радиоволн от спорадического слоя. Характерно, что тем же радиолюбителям из Горького не удавалось установить связь на меньшие расстояния (с гг. Иваново, Владимир, Киров).

Летом 1958 г. в Кировабаде принимались телевизионные передачи из Ташкента, в Воркуте — из Москвы, в Ленинграде — из Лондона, а в Кисловодске — из Саудовской Аравии.

Дальние связи и прием телевидения ведут и радиолюбители Мурманска, хотя в северных районах плотный слой E_s появляется реже, чем в южных. Ночью 6 и 10 января 1959 г. радиолюбителями Мурманска были установлены УКВ связи с радиолюбителями Москвы, Перми, Ленинграда. В эти дни ионосферная станция Мурманска отмечала присутствие слоя E_s, редкого по плотности. В последующие годы возможности приема УКВ, отраженных от слоя E_s, заметно не изменятся.

Возможности сверхдальней связи на УКВ путем отражения волн от слоя E_s далеко не изучены. Однако установлено, что помехи, создаваемые удаленными телевизионными станциями местному приему телевидения, весьма существенны и нельзя не учитывать возможности сверхдальнего приема при размещении и выборе рабочих волн новых станций. Решить этот вопрос помогли наблюдения радиолюбителей.

РАССЕЯНИЕ НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ИОНОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Рассмотренные выше явления — отражение от слоев F_2 и E_s — не могут обеспечить регулярной связи на УКВ. Загруженность диапазона коротких волн настоятельно требует изыскания новых диапазонов для связи, что натолкнуло на попытки исследования возможностей дальней связи на УКВ.

Начиная с 1950 г., стали проводить теоретические и экспериментальные исследования возможности регулярной связи на УКВ на расстоянии свыше 1 000 *км*. Основанием для этого послужило более детальное изучение строения ионизированных слоев атмосферы, установившее их неоднородное строение. Еще не изучено, что именно представляют собой эти неоднородности. Можно себе представить, что это как бы сблака, в которых электронная плотность отличается от электронной плотности окружающей среды. Следовательно, и диэлектрическая проницаемость облака отличается от диэлектрической проницаемости окружающей среды.

Размер неоднородностей оценен исследователями в

100—200 *м*, т. е. для УКВ размер неоднородностей много больше длины волны. Наличие неоднородностей приводит к тому, что наблюдается рассеяние радиоволн. Еще в 30-х годах это явление было обнаружено в диапазоне коротких волн. При работе мощного коротковолнового передатчика слабые сигналы наблюдались в пределах зоны молчания. Было установлено, что эти сигналы исходили из области ионосферы, от которой отражались радиоволны. Явление это было названо «обратным рассеянием». Дальнейшие наблюдения показали, что рассеянные сигналы, хотя и очень слабые, могут наблюдаться во время замирания основного сигнала за пределами зоны молчания. Такое рассеяние названо «прямым рассеянием».

Рассеяние на неоднородностях ионосферы происходит аналогично рассеянию на неоднородностях тропосферы, т. е. падающая на ионизированный слой волна рассеивается отражающей областью, которая служит источником этого вторичного рассеяния. Но в 30-х годах не могли предвидеть, что за счет этого явления возможно осуществление регулярной связи на волнах короче тех, которые могут отражаться в данных условиях.

В течение последних 20 лет изучались неоднородности ионосферы, их размеры, горизонтальное движение и сделаны были попытки установить причины появления и закономерности, свойственные этим неоднородностям. Однако только с 1950 г. начались попытки применить явление рассеяния для дальней связи на УКВ.

В 1951 г. в США под руководством ученого Бейли были поставлены опыты по систематическому наблюдению за приемом сигналов с частотой 50 *Мгц* на расстоянии 1 250 *км* от передатчика. Применялись остронаправленные (ромбические) передающая и приемная антенны и передатчик мощностью 20 *квт*. Опыты эти дали обнадеживающие результаты: в течение примерно полугода, когда велись наблюдения, не было ни одного случая нарушения связи. Правда, сигнал был очень слабым, однако достаточным для уверенного приема. Уровень сигнала менялся в течение суток. Конечно, этих наблюдений далеко не достаточно, чтобы сказать, будет ли такой способ связи надежным на других трассах, при других расстояниях, как лучше всего выбрать рабочие частоты и какова должна быть мощность передатчика.

Эти первые опыты побудили ученых всего мира заняться теоретическим и экспериментальным исследованием

рассеяния радиоволн в ионосфере. В последующие годы было предложено несколько теорий, дающих формулы для расчета напряженности поля рассеянного сигнала. Однако не было возможности проверить их справедливость.

Только в конце 1955 г. были опубликованы результаты 4-летних наблюдений сверхдальнего регулярного приема метровых волн, проводившихся в США и Канаде.

В проведении наблюдений принимали участие ряд научно-исследовательских учреждений и радиолюбители. Наблюдения проводились на семи различных трассах протяженностью 1 200—2 300 *км*. Три исследуемые трассы лежали в районе 50—70° северной широты, т. е. пересекали зону полярных сияний. В этой области связь на коротких волнах особенно подвержена частым нарушениям, и поэтому изыскание возможности других видов связи представляет большой интерес. Остальные трассы лежали в средних широтах (30—45° северной широты).

Передачи велись на частотах 27, 50 и 107 *Мгц*. Использовались передатчики, создающие на входе антенны мощность около 30 *квт*. Для приема и передачи применялись одинаковые остронаправленные ромбические антенны с коэффициентом усиления около 20 *дб*. Диаграммы направленности антенн были рассчитаны так, чтобы максимум основного лепестка был направлен в среднюю точку пути на высоте 100—120 *км*. Приемники имели ширину полосы порядка 2 *кгц* и входное сопротивление 600 *ом*.

Наблюдения проводились круглосуточно, причем за все годы ни на одной из трасс ни разу не наблюдалось нарушения связи, хотя уровень принимаемого сигнала колебался в широких пределах, отличаясь от среднего значения временами на 20 *дб*. Было отмечено, что напряженность поля принимаемого сигнала претерпевает регулярные изменения.

Уровень сигнала достигал максимального значения в полдень, а минимального — в 19—21 *ч* местного времени в средней точке пути. Наибольшее значение напряженности поля наблюдались в дневное время летом. Зимой они были несколько ниже и значительно ниже — весной и осенью.

Временами принимались сигналы, отраженные от спорадического слоя E_s и от следов метеорных тел. В этих случаях уровень сигнала значительно повышался или наблюдались отдельные кратковременные всплески. Эти высокие уровни сигнала рассматривались как случайные явления и при анализе не учитывались.

Ранее оставалось неясным, в какой именно области ионосферы происходило рассеянное отражение радиоволн. Проведенные опыты показали, что это рассеяние происходит днем на высоте 75—80 *км*, а ночью на высоте 85—90 *км*, т. е. ниже слоя E, но несколько выше поглощающего слоя D.

Более поздние опыты, проводившиеся в 1958—1959 гг., показали, что рассеяние может происходить и на бóльших высотах, достигающих 150—200 *км*. Исследование возможностей использования для связи радиоволн, рассеянных на таких высотах, позволит решить вопрос осуществления дальних связей без промежуточных ретрансляционных станций. Предполагают, что окажется возможным увеличить расстояние разноса станций до 3 000—3 500 *км*.

Как и следовало ожидать на основании разработанных ранее теорий, напряженность поля волны, рассеянной в ионосфере, зависит от рабочей частоты, убывая обратно пропорционально некоторой степени частоты. Точно установить зависимость напряженности поля от частоты не удалось. В отдельных наблюдениях показатель степени менялся в пределах 2—4. Следовательно, практически применимыми для этого типа связи окажутся частоты не выше 100 *Мгц*. Особенно ценным свойством рассматриваемого вида распространения радиоволн является устойчивость к тем видам нарушений, которым подвержена связь на коротких волнах.

Во время внезапных вспышек поглощения, вызванных увеличением ультрафиолетовой радиации Солнца, когда возрастает плотность ионизации слоя D и происходит замирание сигнала на коротких волнах, интенсивность сигнала на частотах выше 30—35 *Мгц* усиливается. На частотах 25—27 *Мгц* уровень сигнала несколько снижается, так как на этих волнах сказывается увеличение поглощения в слое D.

Возрастание уровня напряженности поля рассеянной волны наблюдается также во время ионосферно-магнитных возмущений, связанных с проникновением корпускул в нижние слои атмосферы. Это явление часто служит причиной полного нарушения коротковолновой связи в полярных областях.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выяснить ряд особенностей и преимуществ связи на метровых волнах за счет рассеяния их на неоднородностях ионосферных слоев, а также определить возможность об-

ласть применения и требования к аппаратуре при данном виде связи.

Выяснено, что наилучшие результаты получаются при длине трасс 1 000—2 300 *км*. При меньших расстояниях интенсивность сигнала быстро уменьшается. Большие расстояния не могут быть перекрыты путем однократного отражения от ионосферы, а при многократных рассеянных отражениях уровень сигнала чрезвычайно снижается.

Наиболее целесообразным оказывается применение диапазона частот 30—60 *Мгц*. Как указывалось, напряженность поля резко убывает с повышением рабочей частоты, что обусловливает верхнюю границу применимого диапазона. Частоты ниже 30 *Мгц* испытывают поглощение, и связь на них подвержена нарушениям, свойственным коротким волнам.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн предъявляет повышенные требования к применяемой аппаратуре. Передатчик должен иметь значительную мощность. Например, для одноканальной телеграфной связи в арктических условиях на частоте 35 *Мгц* необходима мощность передатчика не менее 5 *квт*.

Во избежание приема запаздывающих сигналов, приходящих от следов метеорных тел или от слоя E_s, появляющихся в стороне от основной трассы, необходимы применение остронаправленных антенн и сужение полосы пропускания приемника. Практически диаграмма направленности антенны может быть не у́же 8°, а ширина полосы — не шире 2 *кгц*.

Для устранения влияния замираний желательно применение двух приемных антенн, разнесенных на расстояние, примерно равное 10 длинам волн, в направлении, перпендикулярном направлению распространения.

Основными преимуществами рассматриваемого вида связи можно считать следующие:

отсутствие нарушений связи во время ионосферных возмущений, что обеспечивает надежную связь в сложных условиях арктических областей;

возможность круглосуточной работы на одной и той же частоте (при работе на коротких волнах рабочие частоты меняются в зависимости от времени года и суток);

уменьшение уровня помех; уровень помех определяется в основном космическими шумами и шумами Солнца; на арктических трассах уровень шумов повышается во время буранов за счет движения снега и кристаллов льда.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн может обеспечить радиотелеграфную связь с надежностью 99,5%. В арктических областях надежность связи снижается не более чем на 0,5%.

К недостаткам такого вида связи можно отнести повышенные требования к используемой аппаратуре и применимость его только для передачи узкой полосы частот.

Явление рассеяния радиоволн на неоднородностях ионосферы нашло уже практическое применение. Надежность такого вида связи в арктических условиях обусловила использование его именно в этом районе. Первая линия сверхдальней связи на УКВ соединила побережье США через Гренландию с Исландией. Таким образом, для перекрытия расстояния свыше 3 000 *км* потребовалась всего одна промежуточная станция. Эта линия рассчитана на передачу и прием одного телефонного и восьми телеграфных (буквопечатающих) каналов.

Имеются сведения о сооружении таких же линий в Англии: одна линия свяжет северную и южную оконечности Британского острова, а вторая — Гибралтар с Англией В ближайшее время предполагается сооружение УКВ линии связи из Европы через Средний Восток в Австралию и Новую Зеландию.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ, ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И «ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ»

Еще в 1931 г. советским инженером, любителем астрономии И. А. Ивановым было обнаружено, что при пролете метеорного тела изменяется слышимость коротковолновых передач. Явление отражения радиоволн ст ионизированного следа метеора можно наблюдать при помощи радиолокационных установок. Специальные наблюдения за метеорами при помощи радиолокационных установок проводились в СССР впервые в 1946 г., когда Земля проходила через интенсивный метеорный поток.

Для наблюдения антенна радиолокационной станции направляется под небольшим углом к горизонту. При пролете метеорного тела в области действия радиолокатора на экране индикатора отмечается характерное эхо. Наблюдения показали, что отражение происходит на высоте 70—120 *км* на расстоянии 700—1 000 *км* от станции.

Вид отраженных сигналов, наблюдаемых на осциллографе, приведен на рис. 58. В момент появления метеорного следа в зоне действия радиолокатора на экране ссцилло-

графа появляется резкий всплеск. По мере того как ионное облако следа метеора рассеивается, сигнал уменьшается и замирает. Длительность отражения не превосходит 10 *сек*, и отражения, длящиеся менее 1 *сек*, наблюдаются в 100 раз чаще, чем отражения, длящиеся около 10 *сек*.

Было обнаружено, что более интенсивные и длительные отражения получаются на более длинных волнах метрового диапазона, а на волнах частотой выше 100 *Мгц* отражения наблюдаются крайне редко. Радиолокационные наблюдения метеоров натолкнули на мысль о возможности использования отражения радиоволн от следов метеорных тел

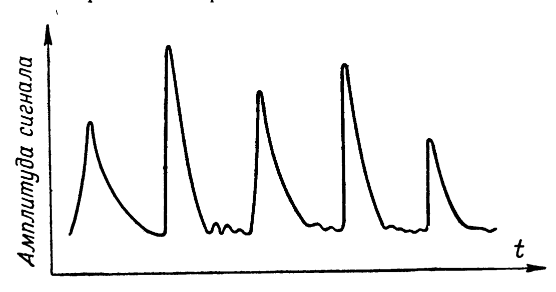


Рис. 58. Осциллограмма сигналов, отраженных от следов метеоров.

для связи. На рис. 59 изображена схема линии связи, использующая явление отражения волн от следов метеоров.

Еще в 1950—1951 гг. радиолюбителям Канады и США удалось осуществить кратковременные связи рассматриваемого типа при рабстe на волнах длиной 10—20 *м* на расстоянии 1 500—2 000 *км*. При этом использовались передатчики мощностью 500 *вт*.

В 1954 г. была начата работа по осуществлению экспериментальных линий связи, использующих кратковременные отражения радиоволн от следов метеоров. В результате были созданы по крайней мере две экспериментальные линии связи: двусторонняя телеграфная линия связи длиной 1 050 *км* между Оттавой и Порт-Артуром в Канаде и односторонняя телеграфная и телефонная линия длиной 1 312 *км* в Калифорнии. Испытание этих линий показало, что они могут обеспечить связь с большой степенью надежности. Благодаря тому, что метеорные следы существуют в ионосфере только короткие промежутки времени, связь за счет отражения от следов метеоров может осуществляться только с перерывами. В настоящее время разра-

ботана аппаратура, работающая таким образом, что передача информации происходит только во время присутствия достаточно интенсивных метеорных следов. Такую прерывную работу линии связи называют «методом перемещающейся связи».

Рассмотрим, как осуществляется работа линии методом «перемещающейся связи». Блок-схема этой системы показана на рис. 60. На обоих концах линии применяется одинаковая аппаратура. Она включает в себя передатчик и

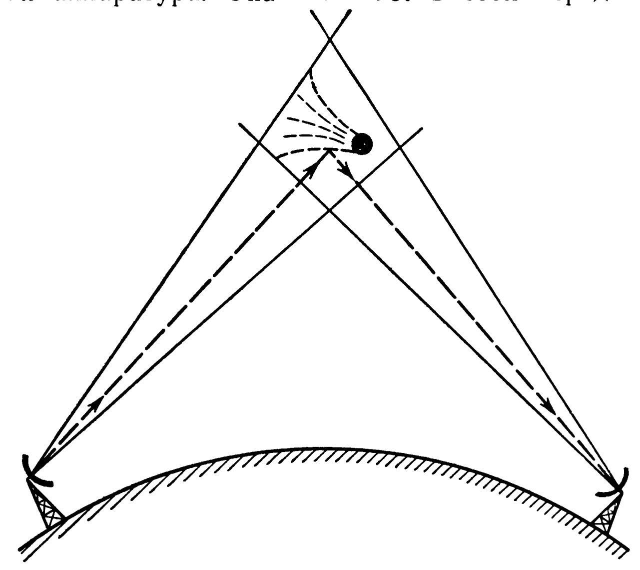


Рис. 59. Схема линии связи, использующей отражение радиоволн от следов метеоров.

приемник, работающие на общую антенну, управляющее устройство, входной и выходной накопители. В качестве антенн применяются пятиэлементные антенны типа волновой канал, излучающие под таким углом к горизонту, чтобы их диаграммы направленности пересекались на высоте 70—120 *км* над земной поверхностью. Применение более сложных антенн с узкими диаграммами направленности не дает выигрыша, так как антенны в этом случае облучают меньшую часть небесной сферы и меньшее количество следов метеоров попадает в зону действия антенн и, следовательно, может быть использовано для связи.

Связь путем отражения радиоволн от следов метеоров может осуществляться на волнах частотой 30—50 *Мгц*.

В вышеописанной системе оба передатчика непрерывно излучают немодулированные колебания постоянной частоты около 40 *Мгц*. При этом передатчик первой станции и приемник второй работают на одной частоте, а приемник первой станции и передатчик второй—на другой частоте, отличающейся от первой примерно на 1 *Мгц*. Пока в области пересечения диаграмм направленности передающей и приемной антенн нет метеорной ионизации, прием отсутствует. При появлении метеорного следа оба приемника начинают принимать немодулированные колебания, излучаемые коррес-

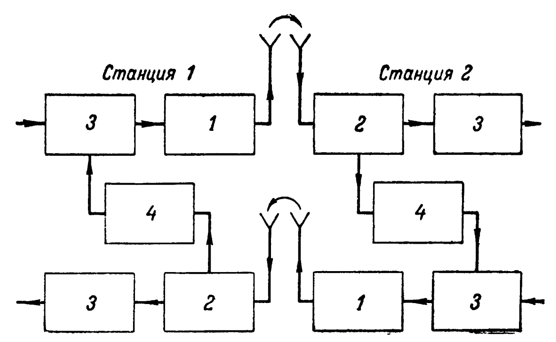


Рис. 60. Блок-схема системы, работающей методом „перемещающейся связи".

1—передатчик; 2—приемник; 3—накопительное устройство; 4—управляющее устройство.

пондирующими пунктами. Принятые колебания поступают в управляющее устройство, и если их уровень превосходит установленную пороговую величину отношения сигнала к шуму, управляющее устройство отпирает манипулятор передатчика. Информация, предварительно зашифрованная специальным кодом, поступает из накопительного устройства передатчика в манипулятор, манипулирующий с большой скоростью несущую частоту передатчика.

Спустя несколько секунд (или долей секунды) после появления метеора след метеора рассеивается. Уровень принимаемого сигнала падает ниже порогового значения, и управляющее устройство выключает манипулятор.

Принятая информация из накопительного устройства приемника поступает на выход с постоянной скоростью 60 слов в минуту. Во время вспышек информация передается по радиолинии со скоростью 1 300 слов в минуту, что, несмотря на перемещающийся характер связи, дает возмож-

ность получить среднюю скорость не ниже обычной. Во входное устройство информация подается в виде перфорированной бумажной ленты. На выходе линии связи в конечном счете получается печатный текст.

Мощность передатчика для работы в системе перемещающейся связи может быть небольшой. В вышеописанной системе использовался передатчик мощностью 750 *вт*. Полоса пропускания приемников составляла 3 *кгц*. За время работы этой системы было обнаружено, что пропускная

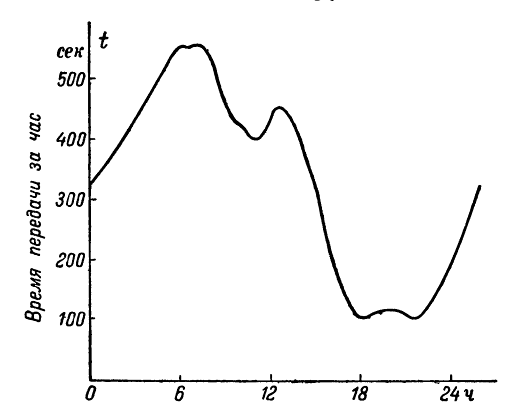


Рис. 61. Время в секундах, в течение которого в данный час была возможна работа системы методом „перемещающейся связи".

способность линии в течение суток меняется примерно так же, как и количество появляющихся метеоров. На рис. 61 показано, как изменяется суммарное время передачи за час. Из графика следует, что в 6 *ч* утра условия работы наилучшие, а в 18—20 *ч* линию можно использовать наименее эффективно.

Преимущества таких систем связи особенно существенны для приполярных районов, так как такой вид связи не подвержен нарушениям, связанным с ионосферными бурями, от которых так страдает коротковолновая связь в этих местах.

Существует мнение, что применение системы перемещающейся связи экономически более выгодно, чем использование ионосферного рассеяния метровых волн.

Радиоволны метрового диапазона могут отражаться от областей полярных сияний. Если в северном полушарии в районе, где наблюдаются полярные сияния, передающую

и приемную антенны направить на север, то при появлении полярных сияний возможно осуществление радиосвязи между пунктами, расположенными на расстояниях до 1 000 *км* и более. При таком виде распространения радиоволн для связи не требуются мощные передатчики и сложные антенны, поэтому явление отражения волн от полярных сияний может быть использовано и для радиолюбительской связи. Радиолюбители Канады неоднократно проводили опыты такой дальней связи на частотах 28—148 *Мгц*. Интересно, что отражение от полярного сияния наблюдалось на станции, лежащей на 1 200 *км* южнее зоны полярных сияний.

Во время сильного полярного сияния над Европой 4—5 сентября 1958 г. европейские радиолюбители установили много дальних связей на расстояниях, превышающих 500 *км*. Связь осуществлялась в диапазоне частот 144—146 *Мгц*. Так, сигналы харьковского радиолюбителя были приняты в Австрии.

В последние годы исследователи обсуждают возможность создания на определенных высотах области с повышенной электронной плотностью, с тем чтобы использовать эти искусственные ионизированные облака для дальней связи на метровых волнах. Был предложен метод «искусственной ионосферы», заключающийся в том, что специально запускаемая ракета выбрасывает на высоте 100—150 *км* над землей легко ионизирующееся вещество —калий. В результате этого образуется столб ионизированного газа, причем размеры столба достигают десятков метров, а электронная плотность оказывается значительно выше, чем электронная плотность на той же высоте в ионосфере. Опыты показали, что такой столб может сохранять значительную электронную плотность примерно в течение часа. После этого за счет воздушных течений, существующих в ионосфере, и диффузии электронная плотность уменьшается и облако рассеивается.

В исследовании искусственной ионосферы участвовали многие радиолюбители, работающие в диапазонах 30—38 и 144—146 *Мгц*. Им удавалось устанавливать связи на расстояниях 1 000—2 500 *км*. Искусственная ионосфера может быть использована для дальней телефонной и телеграфной связи на метровых волнах, причем она может быть создана в любое время и на любой высоте.

Однако с экономической точки зрения создание искусственной ионосферы вряд ли оправдано.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

РАДИОАСТРОНОМИЯ

Основные сведения о Вселенной были получены в результате наблюдений и измерений падающего на Землю электромагнитного излучения. До последних лет при этих наблюдениях ограничивались длинами волн, лежащими в области видимых и близких к ним лучей, т. е. использовались методы оптической астрономии. Применение волн другой длины увеличило возможности экспериментального познания Вселенной. Выше отмечалось, что волны длиннее 10—15 *м* отражаются от ионосферы и не проникают за пределы земной атмосферы (или из-за ее пределов на Землю). Волны короче 1 *см* почти полностью поглощаются в атмосфере. Таким образом, для «связи» со Вселенной могут служить УКВ длиной 1 *см* — 10 *м*.

Идея изучения Вселенной при помощи радиоволн зародилась тогда, когда было обнаружено, что Солнце и Галактика являются мощными излучателями радиоволн.

В настоящее время уже широко развилась наука, занимающаяся изучением космических тел и получившая название радиоастрономии. Осуществляется также изучение космических тел при помощи методов радиолокации, т. е. путем посылки с Земли импульсов от УКВ передатчика большой мощности и исследования полученного отраженного импульса.

Много сведений о строении атмосферы Земли, о межпланетном пространстве, о Луне, о влиянии высотного полета на живые организмы и т. п. получено на УКВ от передатчиков специальных ракет и спутников.

Первое доказательство существования радиоизлучения из космоса было получено в 1932 г., когда на волне 15 *м* наблюдались хаотические сигналы-шумы, интенсивность которых менялась в течение дня и имела период, равный звездным суткам. Это указывало на то, что источник излучения должен находиться за пределами солнечной системы. Дальнейшие наблюдения показали, что интенсивность излучения была максимальной, когда антенны направлялись в центр Галактики, т. е. что источники излучения находятся в центре Галактики. Главным очагом радиоизлучения является район созвездий Скорпиона и Тельца.

Последующие измерения проводились на волнах длиной 50 *см* — 15 *м*. Было обнаружено, что интенсивность излучения пропорциональна кубу длины волны. Источником излучения могут служить межзвездный газ и звезды. Такие же измерения проводились с целью обнаружения аналогичного излучения Солнца. На волне 4 *м* это излучение оказалось весьма интенсивным.

В 1946 г. было получено распределение интенсивности по спектру солнечного радиоизлучения. Оказалось, что максимум принятого излучения имеет место на волне 4,7 *м* и что это излучение имеет значительный уровень во всем диапазоне метровых волн. В этом диапазоне радиоизлучение Солнца связано со вспышками солнечной деятельности. Установлена связь между солнечными пятнами и изменением солнечного радиоизлучения. С увеличением площади солнечных пятен увеличивается интенсивность излучения. Интенсивность излучения меняется так же, как и площади солнечных пятен.

Радиоизлучение Солнца зависит от фазы солнечной деятельности. Наблюдение за солнечной деятельностью дает много данных для прогноза радиосвязей, так как от нее зависят состояние ионосферных слоев и, следовательно, величины рабочих частот.

По радиоизлучению можно более точно судить о солнечной деятельности, чем по площади солнечных пятен. Наблюдение за солнечными пятнами возможно только в ясную погоду, измерению же интенсивности солнечного радиоизлучения облака не мешают. Помехой при измерении радиошумов являются только местные грозы.

Обнаружено, что существует связь между увеличением интенсивности радиоизлучения Солнца и ионосферно-магнитными бурями, приводящими к ухудшению или нарушению связи на коротких волнах. Увеличение интенсивности радиоизлучения наблюдается несколько раньше начала ионосферной бури, что дает возможность предвидеть ее появление и принять соответствующие меры.

Наблюдения за радиоизлучением Солнца и Галактики проводятся с помощью остронаправленных антенн. Обычно используются параболические антенны с зеркалом большой площади. При первых наблюдениях за радиоизлучением Галактики и Солнца выяснилось, что принятый антенной сигнал, поданный на громкоговоритель или осциллограф, подобен хаотическому шуму, генерируемому нагретым сопротивлением. Поэтому радиоизлучение часто называют

радиошумом. Энергия радиоизлучения занимает широкий спектр частот. Поэтому при ее измерениях необходимо учитывать ширину полосы пропускания измерительной аппаратуры. Перед радиоастрономией стоит много задач по изучению Вселенной. Только с помощью радиоастрономии можно получить сведения о явлениях, происходящих на Солнце, о строении звезд, звездных оболочек, происхождении космических лучей и т. п.

ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН ОТ ЛУНЫ

Применение методов радиолокации к изучению строения планет требует колоссальных мощностей передатчиков и встречает ряд других трудностей. Однако делались попытки проведения таких опытсв. Прием сигналов с Земли на Луне принципиально не представляет технических трудностей. Но убедиться, достиг ли посланный с Земли сигнал поверхности Луны, можно только приняв отраженный от Луны сигнал на Земле.

Расстояние Земля—Луна—Земля составляет 750 000 *км*, и затухание сигнала на этом пути составляет 200 *дб*, т. е. сигнал ослабляется в 10^{10} раз.

Первые отражения радиоволн от Луны были получены учеными Венгрии и США, работавшими независимо, еще в 1946 г. Использовались передатчики мощностью порядка 200 *квт*, работавшие на волне длиной около 2 *м*. Применялись сстронаправленные антенны с коэффициентом усиления 400.

Прием на Земле сигналов, отраженных от Луны, встречает большие принципиальные трудности. Луна движется относительно Земли с большой скоростью. При больших скоростях существенную роль играет эффект Допплера, заключающийся в том, что волна, отраженная от движущегося тела, имеет длину, отличную от длины посланной волны.

Расчет, подтвержденный опытом, показывает, что при работе передатчика на волне с частотой 145 *Мгц* разница в частотах переданного и принятого сигналов достигает 200 *гц*. Следовательно, для того чтобы сигнал был принят, приемник должен иметь полосу пропускания не менее 200 *гц*. Однако в этом случае уровень шумов приемника превышает слабый сигнал, пришедший от Луны. С целью уменьшения влияния шумов полоса пропускания приемника не должна превышать нескольких герц. Это в свою очередь приводит к чрезвычайно высоким требованиям к стабильности частоты передатчика. При рабочей частоте в сот-

ни мегагерц он должен иметь стабильность порядка нескольких герц, что весьма трудно обеспечить. Вторая трудность заключается в том, что размеры остронаправленной антенны, предназначенной для работы на метровых волнах, получаются большими, и поэтому ее трудно поворачивать в соответствии с передвижением Луны.

Меньшие размеры антенн требуются при осуществлении радиолокации Луны волнами сантиметрового диапазона. Кроме того, на этих волнах исключается влияние ионосферы. В 1954—1957 гг. в Горьковском университете были поставлены опыты, при которых использовались волны длиной 10 и 3 *см*. Для осуществления радиолокации применялись передатчики мощностью 1—2 *квт* и остронаправленные антенны. Коэффициент направленного действия антенны, предназначенной для работы на волне 3 *см*, достигал 120 000, и вся излучаемая энергия концентрировалась в угле 0,5°. В результате этих опытов был измерен коэффициент отражения радиоволн от Луны, который составил примерно 0,25, и было установлено, что отражение происходит от центральной части видимого диска Луны.

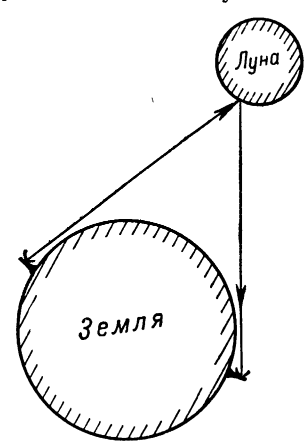


Рис. 62. Схема линии связи, использующей отражение радиоволн от Луны.

Опыты радиолокации Луны дали реальную почву для осуществления идеи использования Луны в качестве ретранслятора. Действительно, во время своего наибольшего удаления от Земли Луна становится видимой почти со всех пунктов полусферы Земли, обращенной к Луне, и, следовательно, путем отражения от Луны возможна связь между всеми пунктами, находящимися на этом полушарии. Но такая радиосвязь не может вестись круглосуточно, неизбежны перерывы связи во время захода Луны (рис. 62).

Проводились отдельные опыты установления связей с использованием Луны в качестве ретранслятора. Для этого применялись передатчики мощностью 100 *квт*, работающие на частоте порядка 200 *Мгц*, причем ширина передаваемой полосы частот составляла 3 *кгц*, т. е. можно было передавать телеграфные и телефонные сообщения. Измере-

ния показали, что радиоволны проходят путь до Луны и обратно за 2,5 *сек.* Однсторонняя радиотелеграфная и радиотелефонная связь с использованием Луны в качестве пассивного ретранслятора осуществлялась весной 1959 г. между Англией и США. Для передачи сигналов использовалась громадная антенна радиотелескопа Манчестерского университета.

В Боннском университете осуществлялся прием отраженных Луной сигналов на волнах 108 и 151 *Мгц*, передаваемых из Бельмара (США). Для радиосвязи использовались передатчик мощностью 50 *квт* и передающая антенна в виде параболического зеркала диаметром 15 *м.* Связь оказывалась возможнсй в течение 6 *ч* в сутки. После захода Луны за линию горизонта прием сигнала был возможен еще в течение 10 *мин.*

Выдвигались проекты использования Луны для ретрансляции передач телевидения. Действительно, телевизионные сигналы, отраженные от Луны, могли бы быть приняты на больших расстояниях и один передатчик мог бы обслуживать большую территорию. Однако описанные выше опыты показали, что в настоящее время это неосуществимо.

Исследователи не считают линии связи, использующие отражения радиоволн от Луны, особенно перспективными. Однако имеются сведения о том, что начато сооружение таких линий между Мэрилендом (США) и Гавайскими островами протяженностью около 7 000 *км.*

Для получения отражений волн от других планет требуются передатчики колоссальной мощности и чрезвычайно большие антенны, поэтому такие опыты не проводились.

РЕТРАНСЛЯЦИЯ РАДИОВОЛН ИСКУССТВЕННЫМИ СПУТНИКАМИ ЗЕМЛИ

Еще до запуска первого искусственного спутника Земли возникла мысль о возможности использования спутников для радиосвязи. Теперь, когда осуществлен запуск спутников большого веса, оснащенных сложной аппаратурой, разрабатываются проекты установления на спутниках ретрансляционных радиостанций. Один из проектов предусматривает использование трех искусственных спутников Земли весом 200—300 *кг* каждый, движущихся по 24-часовой экваториальной орбите на равных расстояниях друг от друга на высоте около 35 000 *км* над Землей. В этих условиях спутники будут приблизительно неподвижны относительно Земли.

На каждом из спутников предполагается установить приемно-передающую радиотрансляционную станцию, работающую в сантиметровом диапазоне радиоволн. Вычислено, что с помощью этих станций можно осуществлять связь между двумя любыми пунктами земного шара, кроме приполярных областей, лежащих на широтах выше 80°. Ожидается, что такая система связи будет иметь несколько телевизионных каналов, сотню телефонных каналов и более тысячи телеграфных каналов; питание ретрансляционных станций проектируется осуществить от солнечных батарей.

В дополнение к этой системе связи предполагается использовать еще один спутник, движущийся по полярной орбите, причем использовать его для обслуживания зоны высоких широт.

На пути создания ретрансляционной линии связи, использующей искусственные спутники Земли, стоит немало трудностей. Сложной задачей являются правильное размещение спутников на орбите, стабилизация их положения и пр.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ПОМЕХИ ПРИЕМУ УКВ

Условия радиоприема определяются не абсолютным значением напряженности поля сигнала, а отношением напряженности поля сигнала к уровню помех. Для каждого вида связи напряженность поля сигнала должна превосходить уровень помех в большее или меньшее число раз. Зная это отношение и уровень помех, можно определить необходимую напряженность поля в месте приема.

В диапазоне УКВ действуют промышленные помехи, помехи космического происхождения и атмосферные помехи. Промышленные помехи создаются различными электрическими устройствами. Среди них рентгенсвские установки, электрические двигатели, системы зажигания двигателей автомобилей и многие другие. Существенными оказываются помехи от гармоник коротковолновых радиостанций и гетеродинов радиоприемников.

С целью устранения паразитного излучения коротковолновых станций до 1961 г. на всех передатчиках мощностью выше 5 *квт* должны быть установлены специальные фильтры. В последние годы все чаще стали отмечаться помехи

телевидению, создаваемые удаленными телевизионными станциями. Больше всего эти помехи проявляются на расстоянии 40—60 *км* от местного телецентра, где его напряженность поля сравнительно мала, и поэтому применяются чувствительные приемники и антенны с большим коэффициентом усиления. Такие помехи создают шумы в звуковом сопровождении и «муары» на изображении.

Помехи другого вида создают самолеты. От пролетающего самолета отражаются радиоволны. В том случае, когда самолет пролетает вблизи приемной антенны, уровень сигнала колеблется, так как меняется фаза отраженной волны. В городах, где самолеты летаюг часто, эти помехи оказываются весьма существенными.

Космические помехи создаются радиоизлучением Галактики и Солнца. Эти помехи проявляются как шум на входе приемника. Помехи радиоприему от радиоизлучения Солнца создаются при использовании остронаправленных приемных антенн и только в тех случаях, когда они оказываются направленными на Солнце. Особенно интенсивны такие помехи в годы максимума солнечной деятельности. Радиоизлучение Галактики является причиной помех и при ненаправленных антеннах.

Чувствительность приемного устройства в УКВ диапазоне определяется уровнем шумов в активном сопротивлении антенной цепи. Под действием галактических помех как бы возрастает уровень шумов, создаваемый активным сопротивлением антенны. Для количественной оценки галактических помех пользуются коэффициентом β, который показывает, во сколько раз возрастает уровень шумов на входе приемника при появлении галактических помех. Зависимость коэффициента β от частоты (*Мгц*) в диапазоне метровых волн определяется выражением

$$\beta=\frac{1,8\cdot 10^6}{f^3}. \qquad (29)$$

Из этой формулы следует, что с уменьшением частоты воздействие помех усиливается.

Атмосферные помехи в УКВ диапазоне несущественны. Они создаются в основном местными грозами.

Грозовой разряд представляет собой импульс тока, содержащий колебания всех частот радиодиапазона. Эти колебания распространяются как радиоволны соответствующих диапазонов и поступают на вход приемника, тем самым создавая помехи. Кроме того, от грозовых и дождевых

туч рассеиваются радиоволны сантиметрового диапазона. Это приводит к ослаблению проходящей волны и отражению части энергии в направлении передатчика. Так, например, при работе радиолокатора сигналы, отраженные от туч, создают помехи, мешающие обнаружению цели. Вместе с тем это явление позволяет вести наблюдение за грозами при помощи радиолокаторов, обнаруживать их на значительном расстоянии и предупреждать о приближении грозы.

В северных областях во время снежных буранов наблюдается своеобразный вид помех. Они вызываются тем, что, перемещаясь с большими скоростями, частицы снега и льда в результате трения электризуются, что создает помехи в виде шума. Уровень такого шума тем больше, чем больше скорость ветра.

Для обеспечения надежной работы любой линии связи на УКВ необходимо правильно выбирать мощности передатчиков и типы антенн, с тем чтобы выдерживалось необходимое отношение сигнал/помеха. Так, например, при приеме телевидения желательно иметь отношение сигнал/помеха не менее 30 *дб*. При этом напряженность поля сигнала должна быть от 100 *мкв/м* в диапазоне частот 50—80 *Мгц* до 1 000 *мкв/м* в диапазоне частот выше 200 *Мгц*. В городах, где имеются сильные источники помех, напряженность поля должна достигать 5 000 *мкв/м*. Поэтому в крупных городах для передач телевидения приходится применять сравнительно мощные передатчики и более высоко поднимать антенны телецентров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко ознакомились с основными особенностями распространения радиоволн. При этом неоднократно указывалось, что далеко не все явления в этой области полностью изучены. Ведь распространение радиоволн — процесс весьма сложный, подверженный влиянию разнообразных природных явлений.

На условия распространения радиоволн оказывают влияние как процессы, происходящие далеко за пределами земной атмосферы (появление солнечных пятен, вспышки на Солнце, космические лучи, метеоры), так и процессы, происходящие вблизи земной поверхности (в ионосфере и

тропосфере) и на самой земной поверхности (строительство новых зданий, движение транспорта и т. п.).

Условия распространения радиоволн изменяются в зависимости от времени суток, времени года, фазы солнечной деятельности, от погоды. Для изучения особенностей распространения радиоволн в различных условиях требуется большое количество наблюдений. Необходимо наблюдать условия распространения радиоволн в разное время, на различных расстояниях, над различной местностью. Обобщая такие наблюдения, можно выявить определенные закономерности и, обосновав их теоретически, получить расчетные формулы. Это позволяет в дальнейшем правильнее вести расчет линий радиосвязи, радиовещания и телевизионного вещания, дает возможность предсказать вероятные нарушения связи и предусмотреть способы борьбы с ними.

Радиолюбители сыграли большую роль в развитии радиосвязи. Ведь именно они первыми стали осваивать диапазон коротких волн и указали путь правильного использования этого диапазона.

При современном широком развитии радиолюбительства возможно проведение массовых наблюдений за распространением радиоволн. Радиолюбители ведут прием сигналов искусственных спутников и космических кораблей, увлекаются дальним приемом телевидения, наблюдают за распространением метровых волн, осуществляют дальние связи в дециметровом диапазоне.

Нет сомнения, что, опираясь на армию советских радиолюбителей, наши научные институты могут проводить массовые эксперименты по изучению распространения радиоволн.

Диапазон радиоволн	Предельное расстояние распространения поверхностной волны, *км*	Пределы расстояний распространения пространственной волны, *км*
Сверхдлинные волны (длиннее 10 000 *м*, ниже 30 *кгц*)	3 000	3 000—10 000
Длинные волны (1 000—10 000 *м*, 300—30 *кгц*)	1 000	1 000—10 000
Средние волны (100—1 000 *м*, 3 000—300 *кгц*)	400	400—3 000
Короткие волны (10—100 *м*, 30—3 *Мгц*)	100	1 000—20 000 (огибают Землю)
Метровые волны (1—10 *см*, 300—30 *Мгц*)	70 (в пределах прямой видимости)	1 000—2 000
Дециметровые (10—100 *см*, 3 000—300 *Мгц*) и сантиметровые (1—10 *см*, 30 000—3 000 *Мгц*)	То же	30—600

РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Основные особенности распространения	Антенны	Применения
Обеспечивается устойчивая связь, уровень сигнала мало меняется в течение суток и года	Антенны очень больших размеров, ненаправленные с низким к. п. д. (10—30%)	Дальняя навигация, телеграфная связь, связь с подводными лодками
То же	То же	То же
Распространение на большие расстояния возможно только ночью, сигнал подвержен замираниям	Антенны, башни, направленность только в вертикальной плоскости, к. п. д.=50—80%	Радиовещание, связь и радионавигация только поверхностной волной
Необходима смена волн (днем 10—25 *м*, ночью 35—100 *м*), ночью сигнал сильнее, связь подвержена нарушениям, сильные замирания сигнала	Направленные антенны, коэффициент направленности 10—100, к. п. д.=60—90%	Связь и радиовещание на большие расстояния
Нерегулярное распространение отражением от слоя E_s днем в летнее время, рассеяние на неоднородностях ионосферы	Остронаправленные антенны, поднятые высоко над землей, коэффициент направленности 10—1 000, к. п. д.=95%	Связь на малые и большие (в Арктике) расстояния, телевидение, радиолокация, радионавигация, связь со спутниками и космическими ракетами
Влияние метеорологических условий, рассеяние и поглощение в тропосфере (ионосфера не влияет)	То же, но коэффициент направленности 1 000—10 000	Связь, телевидение, радиолокация, связь со спутниками и космическими ракетами

ЛИТЕРАТУРА

Аренберг А. Г., Распространение дециметровых и сантиметровых волн, Изд. «Советское радио», 1957.

Погорелко П. А., Новый вид связи на метровых волнах, Изд «Советское радио», 1959.

Сотников С. К., Сверхдальний прием телевидения, Госэнергоиздат, 1958.

Хайкин С. Э., Электромагнитные колебания и волны, Госэнергоиздат, 1959.

Куприевич Н. Ф., Телевизионная техника в астрономии, Госэнергоиздат, 1958.

Загик С. Е. и Капчинский Л. М., Приемные телевизионные антенны, Госэнергоиздат, 1958.

Цена 2 р. 30 к.

С 1/I 1961 г. цена 23 коп.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫПУСКИ:

С. Э. Хайкин, Словарь радиолюбителя (издание второе, переработанное и дополненное), 608 стр., тираж 100 000 экз., цена в переплете 21 р. 40 к., вып 355.

Е. А. Левитин, Электронные лампы, 134 стр., тираж 150 000 экз., ц 3 р. 0,5 к., вып. 368.

Схемы сетевых радиолюбительских приемников, 208 стр., тираж 80 000 экз., ц. 4 р. 55 к., вып. 369.

В. И. Хомич, Приемные ферритовые антенны, 64 стр., тираж 60 000 экз., ц. 1 р. 40 к., вып. 370.

В. Ю. Большов, Экономичный приемник на транзисторах, 32 стр, тираж 110 000 экз., ц. 75 коп., вып. 371.

С. К. Сотников, Сверхдальний прием телевидения, 94 стр., 100 000 экз., ц. 2 р. 20 к., вып. 372.

В. Г. Лугвин, Радиолюбительские конструкции транзисторных приемников, 80 стр., тираж 100 000 экз., ц. 1 р. 80 к., вып. 373.

Л. И. Куприянович, Карманные радиостанции (изд. 2-е переработанное), 48 стр., тираж 75 000 экз., ц. 1 р. 10 к., вып. 374.

Б. З. Михлин, Высокочастотные емкостные индуктивные датчики, 72 стр., тираж 45 000 экз., ц. 1 р. 60 к., вып. 375.

Е. А. Детков, Простой любительский магнитофон, 24 стр., тираж 100 000 экз., ц. 50 коп., вып. 376.

Г. П. Самойлов, Ремонт развертывающих устройств телевизоров, 104 стр., тираж 100 000 экз., ц. 2 р 30 к., вып. 377.

ПЕЧАТАЮТСЯ

Попов П. А., Расчет транзисторных усилителей звуковой частоты.

Изюмова Т. И. и Свиридов В. Т., Полые и ленточные радиоволноводы.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ заказов на книги не принимает и книг не высылает. Книги, выходящие массовым тиражом, высылают наложенным платежом без задатка отделения «Книга — почтой».

ЗАКАЗЫ можно направлять: г. Москва, В-218, 5-я Черемушкинская, 14, Книжный магазин № 93 «Книга — почтой».

РЕКОМЕНДУЕМ заказывать литературу только по плану текущего года. Книги Массовой радиобиблиотеки расходятся очень быстро, и поэтому выпуски прошлых лет давно уже все распроданы.

ВЫСЫЛКУ КНИГ наложенным платежом производит также магазин технической книги № 8 **«Книга — почтой, Москва, Петровка, 15.**